

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

E INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

# **ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MEDIDORES DE CAUDAL EN INSTALACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES**

AUTOR: JAVIER IGLESIAS DIEZ

TUTOR: ANTONIO AZNAR JIMENEZ

Diciembre 2013

## Resumen

En el presente Proyecto se pretende realizar un estudio de los diferentes tipos de medidores de caudal en una planta de tratamiento de aguas residuales. Para poder realizar el estudio se deberá efectuar el desarrollo de un medidor de flujo, que comprende una amplia variedad de disciplinas, incluyendo la interacción de fluidos a través del desarrollo matemático y la evaluación de todo el sistema bajo condiciones ideales, y bajo condiciones reales.

Así mismo se realizará un estudio sobre la selección e instalación de los medidores de caudal en una planta de tratamiento de aguas residuales, para ello se tendrán en cuenta diversos factores, desde el estado de flujo a la tecnología de medidor; de acuerdo a cada una de las fases que comprende el proceso de depuración de aguas residuales.

## **Abstract**

This Project hopes to carry out a study of the various types of flow meters within a wastewater treatment plant. To carry out this study, the development of a flow meter is necessary, a task that requires work in a variety of disciplines, including fluid interactions through a mathematical analysis, and the evaluation of the system under ideal as well as real conditions.

At the same time, a study concerning the selection and the installation of the various flow meters in a wastewater treatment plant will be carried out. To do this, a number of factors will be taken into account, from the state of the water currents to the technology used in the meter, each factor from the perspective of every stage of the purification process.

---

---

## ÍNDICE

Resumen .....	ii
Abstract.....	iii
Capítulo 1: Introducción y Objetivos .....	2
1.1 Introducción .....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estructura del proyecto .....	4
Capítulo 2: Planta de tratamiento de aguas residuales .....	5
2.1 Aguas residuales urbanas.....	6
2.2 Depuración de aguas residuales.....	6
2.2.1 Recogida y conducción.....	6
2.2.2 Tratamiento.....	7
2.2.2.1 Línea de aguas .....	7
2.2.2.2 Línea de fangos.....	9
2.2.3 Evacuación.....	10
Capítulo 3: Especificaciones técnicas de las instalaciones de instrumentación en una EDAR .....	11
3.1 Sensorización e instrumentación .....	12
3.2 Parámetros de medición.....	13
3.3 Ubicación de las instalaciones de instrumentación.....	15
3.4 Montaje de las instalaciones de instrumentación.....	16
3.5 Tiempo de medición .....	16
3.6 Sistema de auto-limpieza de los sensores .....	17
3.7 Protección solar de los sensores.....	18
Capítulo 4: Movimiento de fluidos.....	19
4.1 Introducción .....	20
4.2 Expresión teórica del caudal .....	20

---

4.3 Fluidos reales .....	22
4.3.1 Pérdidas mayores .....	22
4.3.2 Pérdidas menores .....	26
Capítulo 5: Medidores de caudal .....	28
5.1 Medidor de caudal .....	29
5.2 Tipos de medidores de caudal.....	30
5.2.1 Medidores volumétricos .....	30
5.2.1.1 Medidores deprimógenos.....	31
A) El Tubo Venturi.....	31
B) La tobera .....	33
C) Placa orificio o diafragma.....	35
D) Tubo de Pitot .....	37
E) Tubo de Annubar .....	39
5.2.1.2 Medidores de área variable.....	39
A) Rotamétro .....	39
5.2.1.3 Medidores de velocidad.....	43
A) Medidores de turbina.....	43
B) Caudalímetros ultrasónicos.....	44
* Caudalímetros de tiempo de tránsito.....	45
* Caudalímetros de efecto Doppler.....	46
C) Vertedero con flotador para canales abiertos .....	47
* Vertedero de cresta afilada rectangular sin contracción lateral	50
* Vertedero de cresta afilada triangular .....	52
* Vertedero de cresta afilada trapezoidal.....	54
* Canal Parshall .....	55
5.2.1.4 Medidor de fuerza.....	56
A) Placa de impacto.....	56

---

---

5.2.1.5 Tensión inducida.....	58
A) Medidor magnético.....	58
5.2.1.6 Medidores de desplazamiento positivo.....	61
A) Medidor de disco giratorio .....	61
B) Medidor de pistón alternativo.....	62
5.2.1.7 Medidor de torbellinos.....	63
A) Torbellino .....	63
B) Medidor Vortex .....	64
5.2.2 Medidores de caudal máscos .....	65
5.2.2.1 Medidores térmicos de caudal .....	65
5.2.2.2 Medidores de Coriolis.....	67
5.3 Selección de los medidores de caudal.....	71
5.4 Localización de los medidores de caudal en una EDAR .....	73
Capítulo 6: Conclusiones.....	76
6.1 Conclusiones .....	77
Bibliografía.....	79
Anexos.....	81
Anexo A: Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas .....	82
Anexo B: Proyecto de Real Decreto por el que se establecen las condiciones básicas para llevar a cabo la reutilización de las aguas depuradas y se modifica parcialmente el reglamento del dominio público hidráulico aprobado por el real decreto 849/1986, de 11 de abril. ....	96
Anexo C: Normas sobre el grado de protección IP .....	107

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Desarrollo del perfil de velocidades de un fluido en un tubo. ....	23
Figura 2: Flujo laminar (a) y flujo turbulento (b). ....	24
Figura 3: Diagrama de Moody. ....	26
Figura 4: Coeficientes adimensionales de pérdida de carga secundaria [3]. ....	27
Figura 5: Tubo Venturi. ....	31
Figura 6: Situación de las alturas de dos puntos en el Tubo Venturi. ....	32
Figura 7: Coeficiente de descarga para el Tubo Venturi. ....	33
Figura 8: Tobera. ....	34
Figura 9: Coeficiente de descarga para toberas. ....	34
Figura 10: Placa orificio o diafragma. ....	35
Figura 11: Efecto de la vena contracta. ....	36
Figura 12: Distintos tipos de orificios. ....	36
Figura 13: Tubo de Pitot. ....	37
Figura 14: Funcionamiento del Tubo de Pitot. ....	38
Figura 15: Rotámetro. ....	40
Figura 16: Fuerzas que actúan sobre el flotador en la condición de equilibrio. ....	40
Figura 17: Coeficiente de descarga para rotámetros. ....	42
Figura 18: Medidor de turbina. ....	43
Figura 19: Caudalímetro de tiempo de tránsito. ....	45
Figura 20: Caudalímetro de efecto Doppler. ....	46
Figura 21: Vertedero de lámina libre (a). Vertedero sumergido (b). ....	48
Figura 22: Vertedero normal (a). Vertedero inclinado (b). Vertedero quebrado (c). Vertedero curvilíneo (d). ....	48
Figura 23: Vertedero de cresta afilada (a). Vertedero de cresta ancha (b). ....	48
Figura 24: Vertedero rectangular (a). Vertedero trapezoidal (b). Vertedero triangular (c). Vertedero parabólico (d). ....	49
Figura 25: Vertedero sin contracción lateral (a). Vertedero con contracción lateral (b). ....	49
Figura 26: Vista lateral de un vertedero rectangular de cresta afilada sin contracción lateral. ....	51
Figura 27: Vista frontal de un vertedero rectangular de cresta afilada sin contracción lateral. ....	51
Figura 28: Vertedero triangular. ....	52

---

Figura 29: Vertedero trapezoidal.....	54
Figura 30: Canal Parshall. ....	55
Figura 31: Medidor placa de impacto.....	57
Figura 32: Medidor magnético. ....	59
Figura 33: Esquema de conexiones de un medidor magnético. ....	60
Figura 34: Medidor de disco giratorio.....	61
Figura 35: Medidor de pistón alternativo. ....	62
Figura 36: Medidor por torbellino. ....	63
Figura 37: Medidor Vortex.....	65
Figura 38: Medidor térmico de caudal. ....	66
Figura 39: Medidor de Coriolis. ....	67
Figura 40: Medidor de Coriolis. ....	69
Figura 41: Planta de tratamientos de aguas residuales .....	74



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros a medir en la línea de aguas.....	13
Tabla 2: Parámetros a medir en la línea de fangos.....	14
Tabla 3: Correlaciones en función del material del conducto (k: rugosidad del conducto) y del número de Reynolds. ....	25
Tabla 4: Valores del coeficiente de descarga para vertederos triangulares [7]. ....	53
Tabla 5: Constantes del Canal Parshall [5].....	56
Tabla 6: Características de los medidores de flujo en función del fluido utilizado.....	72
Tabla 7: Características de los medidores de flujo en función de la aplicación.....	72
Tabla 8: Lugar de colocación de los caudalímetros en una EDAR. ....	74
Tabla 9: Grados de protección para sólidos y líquidos.....	105

---

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

*EDAR*: Estación depuradora de aguas residuales.

*he*: Habitantes equivalente.

*SCADA*: Supervisory Control And data acquisition. Adquisición de datos y supervisión de control.

*m*: Metros.

*IP*: Índice de protección.

*Pa*: Pascales.

*Kg*: Kilogramos.

*s*: Segundos.

*N*: Newton.

*cm*: Centímetros.

*mm*: Milímetros.

*atm*: Atmosférica.

*l*: Litros.

*mA*: Miliamperios.

*c.c.*: Corriente continúa.

*HART*: Highway Addressable Remote Transducer. Transductor Remoto  
Direccionable en Red.

*min*: Minutos.

*μmhos*: Micromhos.

*St*: Expresión de Strouhal.

*J*: Julios.

*g*: Gramos.

*Wb*: Weber.

*°C*: Grados centígrados.

## **Capítulo 1**

# **Introducción y Objetivos**

## 1.1 Introducción

A lo largo de los últimos años, el rápido desarrollo industrial, la creciente urbanización y el cambio en las prácticas agrícolas, entre otros factores, han provocado no sólo un notable incremento de la demanda de los recursos hidráulicos sino también un significativo deterioro de su calidad.

La degradación del medio hídrico ha sido y sigue siendo un factor limitante para el desarrollo económico pues afecta de forma negativa a sus usos potenciales, desde el abastecimiento público hasta cualquier actividad recreativa, llegando incluso a afectar y modificar los ecosistemas.

Puede afirmarse que, en general, el grado de contaminación de las aguas está íntimamente relacionado con alguna o algunas de las causas siguientes:

- Aguas residuales municipales no tratadas o sólo parcialmente tratadas.
- Vertidos industriales o de origen agropecuario.
- Contaminación de origen difuso (escorrentías, aguas de tormentas, transporte por vía atmosférica...).

Los desechos líquidos, de origen tanto doméstico, como urbano e industrial, pueden representar un peligro higiénico-sanitario y un daño estético y económico importante. Es sabido que una evacuación correcta de las aguas residuales se traduce, de hecho, en un descenso de la incidencia de las enfermedades. Así pues, la existencia y el mantenimiento de un sistema de recogida y evacuación de aguas residuales adecuado y funcional deben ser condiciones primordiales para el saneamiento ambiental y el bienestar de la población.

La aprobación de la Directiva Comunitaria 91/271/CEE de mayo de 1991 sobre el Tratamiento de las Aguas Residuales (Anexo A), cuyo objetivo es proteger el medio ambiente de los efectos adversos de los vertidos, establece la necesidad de estudio y tratamiento de los vertidos urbanos e industriales.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo del presente proyecto consiste en el estudio de los diferentes medidores de caudal para la selección del sistema óptimo a implementar en los distintos puntos de aforamiento de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR).

Esté objetivo se verá concretizado en la determinación de los criterios de selección de los diversos medidores de caudal, así como de los puntos de ubicación de los mismos.

## **1.3 Estructura del proyecto**

El proyecto está dividido en 6 capítulos, el primero de los cuales es esta introducción. En el segundo capítulo, denominado planta de tratamiento de aguas residuales, se presentan los diferentes procesos necesarios para la depuración de estas aguas. En el capítulo tercero se presentan las especificaciones técnicas de las instalaciones de instrumentación en una EDAR, es decir, las condiciones generales que deben cumplir los distintos equipos de instrumentación y control a instalar. En el capítulo cuarto se realiza un estudio del movimiento de los fluidos. El capítulo quinto se dedica a los medidores de caudal, se describe el principio de funcionamiento de cada uno de los tipos y su localización dentro de la EDAR. El capítulo sexto está reservado a las conclusiones del proyecto. Por último la bibliografía utilizada en el desarrollo del proyecto y los anexos, en los cuales se presentan las directivas y reglamentos utilizados para el tratamiento de aguas residuales.

## **Capítulo 2**

# **Planta de tratamiento de aguas residuales**

## 2.1 Aguas residuales urbanas

El Real Decreto-Ley 11/95 de 28 de Diciembre, que transpone la Directiva 91/271/CEE (Anexo A), establece las siguientes definiciones:

- *Aguas residuales domésticas*: las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- *Aguas residuales industriales*: todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.
- *Aguas residuales urbanas*: mezcla de las aguas residuales domésticas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial. La incidencia de las aguas residuales industriales dependerá del grado de industrialización de la aglomeración urbana y de la cantidad y características de los vertidos que las industrias realicen a la red de colectores municipales. Las aguas de escorrentía pluvial tendrán su influencia en las aglomeraciones con redes de saneamiento unitarias y en los momentos en que se registren lluvias.

## 2.2 Depuración de aguas residuales

Las instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales urbanas constan de tres elementos principales:

### 2.2.1 Recogida y conducción

La recogida y conducción de las aguas residuales desde donde se generan hasta la estación depuradora se realiza a través de una compleja red de tuberías, alcantarillado y colectores. Dependiendo de la topografía, las aguas discurrirán por gravedad o será necesario recurrir a su bombeo.

Normalmente, los sistemas de recogida son unitarios. Es decir, la red de saneamiento recoge tanto las aguas residuales, como las de lluvia. En otros casos,

aunque aún en baja proporción, los colectores que llegan a la estación de tratamiento transportan tan sólo aguas residuales, mientras que las aguas de lluvia se recogen en colectores independientes, sistemas separativos.

Con el objetivo de que a la estación depuradora no llegue más caudal del proyectado, en los colectores y en las obras de llegada a las EDAR se instalan aliviaderos, que permiten derivar los excesos de caudal. Esta situación tiene lugar principalmente en períodos en los que se registran fuertes lluvias. Una vez finalizada la aportación de tormentas, el volumen desviado en los aliviaderos se reintroduce gradualmente en la depuradora para su correcto tratamiento. Para ello se diseñan grandes depósitos de almacenamiento llamados estanques de tormenta y balsas de homogeneización.

### **2.2.2 Tratamiento**

El tratamiento de las aguas residuales consta de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persiguen eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en los efluentes tratados cumplan los límites legales existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores.

En las depuradoras convencionales de aguas residuales se distinguen dos líneas de tratamiento:

- *Línea de agua*: incluye los procesos o tratamientos que permiten reducir los contaminantes presentes en las aguas residuales.
- *Línea de lodos*: en ella se tratan la mayor parte de los subproductos que se originan en la línea de agua.

#### **2.2.2.1 Línea de aguas**

En la línea de agua, las aguas residuales antes de su tratamiento, propiamente dicho, se someten a un pretratamiento, que comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible



de materias, que, por su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento.

El correcto diseño y posterior mantenimiento de la etapa de pretratamiento son aspectos de gran importancia, pues cualquier deficiencia en los mismos repercutirá negativamente en el resto de las instalaciones originando obstrucciones de tuberías, válvulas y bombas, desgaste de equipos, formación de costras, etc.

Dentro del pretratamiento se incluyen las operaciones de separación de grandes sólidos; de desbaste para separación de sólidos pequeños y medianos; de tamizado para la reducción del contenido en sólidos en suspensión; de desarenado para la eliminación de materias pesadas; y de desengrase para la eliminación de grasas y materias flotantes.

A continuación tiene lugar el tratamiento primario, en el cual se realiza la separación por medios físicos o fisicoquímicos de las partículas en suspensión no retenidas en el pretratamiento.

Los tratamientos primarios más habituales son la decantación primaria, cuyo objetivo es la eliminación de la mayor parte posible los sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad; y los tratamientos fisicoquímicos, en los cuales mediante la adición de reactivos químicos, se consigue incrementar la reducción de los sólidos en suspensión.

Seguidamente se realiza el tratamiento secundario, proceso que incluye un tratamiento biológico con sedimentación secundaria, en el que se consigue la eliminación de materia orgánica.

El tratamiento biológico se realiza con la ayuda de microorganismos, fundamentalmente bacterias, que en condiciones aerobias o anaerobias actúan sobre la materia orgánica presente en las aguas residuales.

Los procedimientos más usuales son el proceso denominado fangos activos, el cual se realiza a través de un tanque o reactor biológico, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión y se realiza la oxidación de la materia orgánica; y los denominados lechos bacterianos o percoladores, que son tanques circulares rellenos de

piedras o materiales sintéticos formando un filtro con un gran volumen de huecos, destinado a degradar biológicamente la materia orgánica del agua residual.

Por último, se efectúan los tratamientos terciarios que permiten obtener efluentes finales de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes o puedan ser reutilizados.

Estos tratamientos consisten en procesos físico-químicos o biológicos que utilizan la precipitación, la filtración, la cloración,... para reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos del efluente final, así como otros contaminantes minoritarios o aportados por procesos industriales.

#### **2.2.2.2 Línea de fangos**

El tratamiento de las aguas residuales conduce a la producción de unos subproductos conocidos como lodos o fangos. Cabe distinguir entre lodos primarios, sólidos decantados en el tratamiento primario, y lodos secundarios o biológicos, sólidos decantados en el clarificador tras el paso de las aguas por el reactor biológico. Pero parte de los fangos generados en el reactor biológico, y sedimentados en el decantador secundario, son recirculados para asegurar la actividad de los microorganismos en el reactor biológico.

Dado su elevado contenido en agua, superior a un 95%, se hace necesario su tratamiento de cara a reducir su volumen y facilitar su manejo y transporte posterior. El destino final de los lodos es la reutilización agrícola, valorización energética ó vertedero controlado. Por ello en toda EDAR, y funcionando en paralelo a la línea de aguas, ha de existir una línea de fangos.

La primera etapa es el espesamiento, tratamiento en el cual se incrementa la concentración de los lodos mediante la eliminación de parte del agua que contienen. Los métodos de espesamiento más habituales son por gravedad y por flotación, siendo este último el más apropiado para el espesamiento de los lodos biológicos.

A continuación tiene lugar la fase de la digestión, en la cual los fangos espesados son bombeados a un digestor, donde aprovechando la actividad biológica de los microorganismos, se reducirá la parte fermentable. Este proceso puede ser aerobio o no, en función de si hay presencia de oxígeno o no. No todas las depuradoras disponen de una digestión, sino que depende principalmente del tamaño de la planta.

La última fase del tratamiento: la deshidratación, se elimina parte del agua contenida en los lodos, transformándolos en sólidos fácilmente manejables y transportables. Los lodos deshidratados presentan un 20-25% de materia seca. Los métodos de deshidratación más habituales son: centrifugación, filtros banda, secado térmico y eras de secado.

### **2.2.3 Evacuación**

En una estación depuradora la corriente entrante, aguas residuales urbanas, como consecuencia de los procesos de tratamiento a que se ve sometida, se transforma en dos corrientes salientes: efluentes depurados y lodos. Con la evacuación de ambas corrientes se da por finalizado el tratamiento de las aguas residuales urbanas. En poblaciones de más de 5000 *he*, o que viertan en cauces especialmente sensibles, debe existir algún sistema de tratamiento terciario de las aguas para la eliminación de la mayor parte del nitrógeno y fósforo soluble presentes en las aguas finales.

Los efluentes depurados, si han alcanzado el grado de tratamiento requerido en cada caso, pueden ser vertidos a los cauces próximos a la estación depuradora, o destinados a otros usos como la reutilización en riego agrícola, refrigeración industrial, usos recreativos, recarga de acuíferos...

En mayo de 2006, el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España redactó el Proyecto de Real Decreto (Anexo B), por el que se establecen las condiciones básicas para la reutilización de las aguas depuradas y se modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por Real Decreto 849/1986 de 11 de abril, en la que se recogen los criterios fisicoquímicos y biológicos que deben cumplir las aguas residuales depuradas para su reutilización en los diferentes usos urbanos, agrícolas, industriales, recreativos y ambientales.

## **Capítulo 3**

# **Especificaciones técnicas de las instalaciones de instrumentación en una EDAR**

---

### 3.1 Sensorización e instrumentación

La instrumentación utilizada suele estar formada por un sensor y un transmisor. El sensor es el encargado de realizar la medida mientras que el transmisor amplifica la señal medida, la interpreta, transforma y refleja en una pantalla con las unidades correspondientes.

Se considera parte de la instrumentación elementos desde el manómetro tipo Bourdon pasando por amperímetros hasta complejos analizadores como oxímetros, clorómetros, analizadores de  $H_2S$ , analizadores  $CH_4$ ...

Los materiales que se emplean en todas las instalaciones de ampliación y reforma, serán nuevos atendiéndose a las especificaciones propias del proyecto de diseño, no permitiendo de ningún modo utilizar materiales desechados de otra instalación.

Dado el ambiente corrosivo en las instalaciones, todos los materiales metálicos, sin excepción, serán de acero inoxidable AISI 316L: tornillos, tuercas, arandelas, abrazaderas, válvulas, electroválvulas, actuadores, ganchos, soportes, techos solares, tapas de registro... independientemente de su ubicación interior o a la intemperie.

Se debe priorizar en la selección de materiales y equipos, siempre y cuando sea conveniente, la homogeneización de marcas de los mismos, de forma que se optimice el mantenimiento de la instalación.

Todos los equipos de instrumentación a instalar en tuberías, así como electroválvulas o válvulas con cualquier tipo de actuador, tendrán construido en paralelo un by-pass con el adecuado número y tipo de válvula de corte, de modo que ante una avería de la válvula automática se pueda anular su línea poniendo en servicio el by-pass manual diseñado.

### 3.2 Parámetros de medición

Antes de la construcción de la depuradora, en el proceso de diseño, se debe realizar una caracterización del agua influyente, donde se determinan todos los parámetros necesarios en el correcto diseño de la planta desde el punto de vista funcional y de la seguridad.

Los parámetros a medir dependerán de la capacidad y el diseño de la planta de depuración. En las tablas 1 y 2 se indican los parámetros que deben ser medidos, dispuestos estos de acuerdo a la clasificación de líneas de proceso, línea de aguas y línea de fangos, dependiendo de la capacidad de tratamiento de las EDAR's.

Parámetros a medir	Lugar de medición	Observaciones	EDAR's Qd < 1000m <sup>3</sup> /día	EDAR's Qd > 1000m <sup>3</sup> /día
<i>Pretratamiento</i>				
pH	Entrada de planta		SI	SÍ
Conductividad	Entrada de planta		SI	SÍ
Sulfatos	Entrada de planta		NO	SÍ
<i>Primario</i>				
pH	Salidas de sistemas de corrección	En caso de ser necesario ajustes del pH	NO	SÍ
<i>Reactor biológico</i>				
Oxígeno	En biológico		SÍ	SÍ
Medidor rédox	En biológico	Si el tipo de planta permite la eliminación de nutrientes	SÍ	SÍ
<i>Decantación</i>				
Medidor de interfase del manto de fango	En decantadores		NO	SÍ
<i>Evacuación</i>				
Cloro residual libre	Salida de planta	En caso de cloración	SÍ	SÍ
Turbidez	Salida de planta		SÍ	SÍ

**Tabla 1: Parámetros a medir en la línea de aguas.**

Parámetros a medir	Lugar de medición	Observaciones	EDAR's Qd < 1000m <sup>3</sup> /día	EDAR's Qd > 1000m <sup>3</sup> /día
<i>Espesamiento</i>				
Medidor de interfase de nivel	En el espesador		NO	SÍ
<i>Digestión</i>				
Oxígeno	En el digestor	En caso de digestión aerobia	SÍ	SÍ
pH	En el digestor	En caso de digestión anaerobia	SÍ	SÍ
Temperatura	En el digestor	En caso de digestión anaerobia	SÍ	SÍ
<i>Espesador después de la digestión</i>				
Nivel del espesador	En el espesador		NO	SÍ

**Tabla 2: Parámetros a medir en la línea de fangos.**

Todos los depósitos de almacenamiento para aquellos productos que intervienen en la línea de proceso: productos químicos, polielectrolitos, coagulantes, ajuste de pH... deberán tener un sistema de medición del agente así como un medidor de nivel visual y exterior en el depósito correspondiente.

Se instalarán detectores de sulfhídrico en lugares donde se pueda producir fugas, y que puedan ocasionar daños al personal de las instalaciones. Estos detectores estarán conectados con una red de alarmas.

Según la criticidad del parámetro a medir en las condiciones del proceso de la depuradora, la información obtenida se procesará a través de un sistema SCADA general de la planta o bien, reencaminada a un centro de control donde se puedan tomar las decisiones apropiadas para la continuidad del proceso.

Aquellos parámetros que no sean necesarios llevar a SCADA, se presentará como mínimo en un display fácilmente visible para su monitorización en campo, mínimo a 1 m. del suelo.

---

### 3.3 Ubicación de las instalaciones de instrumentación

Para una correcta ubicación del transmisor, éstos se instalarán en un lugar accesible a la altura de la vista, o como mínimo a 1 *m.* del suelo, y lo más próximo posible al sensor, procurando no exceder en 10 *m.* la distancia entre transmisor y sensor. Si dicha distancia fuera mayor, se priorizará la compra desde fábrica de un sensor con la longitud de cable deseada frente a la realización del empalme con cable de idénticas características, modelo y fabricante. Las condiciones de montaje serán como mínimo las del fabricante o mejoradas.

La ubicación de los sensores será acorde a las condiciones del proceso, elementos, análisis, o método de medida así como a las propias características del equipo. Los parámetros a considerar en función del tipo de sensor serán los siguientes:

- Sensor de inmersión o internos:

- Distancia del sensor a las paredes del canal o balsa.
- Distancia del sensor al fondo del canal o balsa.
- Profundidad de inmersión del sensor.
- Verticalidad del sensor.
- Inclinación del sensor.
- Orientación del sensor.
- Distancia del sensor a elementos perturbables fijos o móviles, como

turbinas, agitadores...

- Previsión de futuras ampliaciones en planta o incorporaciones de

nuevos equipos.

- Sensores de inserción o externos:

- Longitud del tramo de estabilización aguas arriba del sensor.
- Longitud del tramo de estabilización aguas abajo del sensor.
- Posición dentro de la tubería: parte superior, inferior o central.
- Ubicación en tramo horizontal o vertical.
- Posición vertical, horizontal o inclinada.
- Orientación.



---

### 3.4 Montaje de las instalaciones de instrumentación

El montaje siempre se realizará previendo las posteriores labores de mantenimiento preventivo y correctivo, así como las verificaciones y calibraciones a que será sometido cada instrumento, con independencia de la periodicidad. En este sentido se diseñarán soportes y elementos tales que, por sus características: extensibles, abatibles, rotativos... permitan un fácil y rápido desmontaje y montaje del sensor que no conlleve la realización de grandes esfuerzos ni peligre tampoco la integridad del sensor. A ser posible, se diseñarán de modo que una sola persona sea capaz de realizar estas actividades con el mínimo número de herramientas.

Las características de montaje en función del tipo de sensor serán las siguientes:

- Sensor de inmersión o internos:
  - Fácil extracción e instalación del sensor.
  - Exceso de cableado para poder extraer cómodamente el sensor.
  - Flexibilidad en último tramo de la tubería para la auto-limpieza.
- Sensores de inserción o externos:
  - Válvulas de estanqueización antes y después del sensor.
  - By-pass del sensor, para permitir la operatividad de la línea en episodios de reparación, sustitución o mantenimiento; o bien construcción de un carrete de desmontaje preparado para sustituir al del sensor en caso de necesidad.
  - Enlaces de tres piezas antes y después del sensor, dónde fuera posible, para fácil desmontaje.
  - Enlaces de tres piezas en la rosca del propio sensor, si fuera posible, para evitar el enrollamiento del cable de señal hacia el transmisor.

### 3.5 Tiempo de medición

El tiempo de medición será el establecido para cada proceso, y en función del mismo los instrumentos de la planta se clasificarán como:

- Instrumentos de medida continua: monitorizan constantemente el parámetro de medida.

- Instrumentos de medida discreta: indican la lectura del parámetro a monitorizar en intervalos de tiempo definidos por las condiciones del proceso.

Siempre que sea posible, se recomienda que las medidas sean en continuo.

### **3.6 Sistema de auto-limpieza de los sensores**

Cada sensor lleva asociado un sistema de auto-limpieza del mismo, exceptuando los sensores de ultrasonidos. Para ello, se seleccionarán los transmisores de los equipos de medida de tal forma que proporcionen en su matriz configurable un temporizador programable para auto-limpieza con un mínimo de dos salidas de relé electromecánicos, exigiendo al menos lo siguiente:

- Ciclo de limpieza con: 1º tiempo de aclarado, 2º tiempo de aplicación del agente de limpieza, y 3º tiempo de aplicación.
- Hold o congelación de la salida analógica del transmisor mientras dure la limpieza.

Se intentará seleccionar equipos del mercado que ofrezcan estas posibilidades; si esto no fuera viable, se instalará y programará un controlador digital con lógica programable. En el mercado existen varios modelos tales como Logo de Siemens,...

Las electroválvulas necesarias para esta instalación de auto-limpieza serán construidas de acero inoxidable y, de estar a la intemperie, se protegerán por una envolvente de material plástico con tapa transparente más techo protector solar, indicando con un equipo de rotulación la funcionalidad de cada una de ellas. Esta rotulación será doble: no sólo en la envolvente sino también en el propio cable de alimentación eléctrica de cada electroválvula, teniendo prioridad esta última rotulación sobre la primera.

Si la limpieza se realiza con agua no potable, agua de salida de la EDAR, será obligatoria la instalación de un filtro en Y de anillas de micraje adecuado. No se emplearán filtros de malla. Su ubicación exacta debe ser antes de la electroválvula, no

sólo para proteger de impactos los sensores sino también para evitar la obstrucción de la propia electroválvula.

Por el contrario, si la limpieza se realiza con agua potable será obligatoria la instalación de una válvula antirretorno construida en AISI 316L que elimine la posibilidad de contaminación con agua residual de la red pública de agua potable.

### **3.7 Protección solar de los sensores**

La protección de la incidencia solar directa afecta no solo a los transmisores sino también a los sensores. Por lo tanto, se deberá dotar de un sistema de protección contra el sol a todos los equipos de instrumentación ubicados exteriormente.

El protector siempre se construirá con chapa de acero inoxidable AISI 316L por su elevada conductividad térmica. Además, en su cara inferior se adherirá un material de aislante térmico, como el armaflex, de al menos 1 *cm.* de grosor.

La longitud de la visera del techo que sirve de protector solar será de longitud tal que evite la incidencia directa del sol sobre el display del transmisor a lo largo de todo el día. Para ello, la orientación que tenga el transmisor es un aspecto importante a tener en cuenta.

Cualquier equipo situado a la intemperie dispondrá, de al menos, protección IP65. Si existe riesgo de inundación, será exigible IP68 (Anexo C).



## **Capítulo 4**

# **Movimiento de fluidos**

## 4.1 Introducción

El estudio del movimiento de los fluidos se puede realizar a través de la dinámica o de la energía que éstos tienen en su movimiento.

Una forma de estudiar el movimiento es fijar la atención en una zona del espacio, en un punto en un instante  $t$ , en el que se especifica la densidad, la velocidad y la presión del fluido. En ese punto se examina lo que sucede con el fluido que pasa por él.

Al movimiento de un fluido se le llama flujo y dependiendo de las características de éste se les puede clasificar en:

- *Flujo viscoso y no viscoso*: los flujos viscosos son aquellos que presentan resistencia al avance. Todos los fluidos reales son viscosos.
- *Flujo incompresible y compresible*: los flujos incompresibles son aquellos en que la densidad prácticamente permanece constante.
- *Flujo laminar y turbulento*: en el flujo laminar, el fluido se desplaza en láminas o capas paralelas. En el turbulento las partículas se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares.
- *Flujo permanente*: es aquel en el que las propiedades como la densidad, la velocidad, o la presión no cambian en el tiempo en un punto del espacio.

## 4.2 Expresión teórica del caudal

La ley de conservación de la masa (ec. 1) establece que en un flujo estacionario todo el flujo de masa que entra por un lado de un recinto debe salir por otro.

$$v_1 \rho_1 A_1 = \text{Constante} \quad (\text{ec. 1})$$

$$v_1 \rho_1 A_1 = v_2 \rho_2 A_2 \quad (\text{ec. 2})$$

Donde:

$v_1$ : Velocidad a la entrada del tubo  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .

$v_2$ : Velocidad a la entrada de la garganta  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .

$\rho_1$ : Densidad del fluido a la entrada del tubo  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ .

$\rho_2$ : Densidad del fluido a la entrada de la garganta  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ .

$A_1$ : Área a la entrada del tubo ( $m^2$ ).

$A_2$ : Área a la entrada de la garganta ( $m^2$ ).

Si el fluido es incompresible:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho \quad (\text{ec. 3})$$

Por lo que la (ec. 2), queda:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (\text{ec. 4})$$

$$vA = \text{Constante} \quad (\text{ec. 5})$$

El producto de  $vA$  se denomina caudal de flujo o flujo voluétrico:

$$Q = vA \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

$Q$ : Caudal o flujo de volumen  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$ .

Por otro lado, la ley de Bernouilli (ec. 2) establece que para dos puntos situados en la misma línea de corriente de un fluido estable e incompresible se cumple:

$$P + \rho gy + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{Constante} \quad (\text{ec. 7})$$

$$P_1 + \rho gy_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gy_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

$P_1$ : Presión hidrostática a la entrada del tubo ( $Pa$ ).

$P_2$ : Presión hidrostática a la entrada de la garganta ( $Pa$ ).

$g$ : Gravedad  $\left(9,8 \frac{m}{s^2}\right)$ .

$y_1$ : Altura a la entrada del tubo ( $m^2$ ).

$y_2$ : Altura a la entrada de la garganta ( $m^2$ ).

## 4.3 Fluidos reales

En la ecuación de Bernoulli (ec. 8) se toma en cuenta únicamente los cambios de nivel y de velocidad del flujo. En los flujos reales se debe tener en cuenta el rozamiento. El efecto del rozamiento produce pérdidas de presión, estas pérdidas se dividen en pérdidas mayores o primarias y en pérdidas menores o secundarias. Las pérdidas mayores se deben al rozamiento en un flujo completamente desarrollado que pasa a través de segmentos del sistema con área de sección transversal constante. Y las pérdidas menores se deben a la presencia de válvulas, bifurcaciones, codos y a los efectos de rozamiento en aquellos segmentos del sistema cuya área de sección transversal no es constante.

### 4.3.1 Pérdidas mayores

Las pérdidas mayores son las pérdidas de rozamiento en el contacto del fluido con la superficie. Tienen lugar en flujo uniforme y por lo tanto, principalmente se producen en tramos de tuberías de sección constante.

La ecuación de Bernoulli (ec. 8) teniendo en cuenta las pérdidas de rozamiento se puede escribir como:

$$\left(P_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2\right) - \left(P_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2\right) = h_{1 \rightarrow 2} \quad (\text{ec. 9})$$

Donde:

$h_{1 \rightarrow 2}$ : Pérdidas de carga mayores.

Considerando un flujo incompresible a través de un tubo de sección transversal circular, el flujo es uniforme a la entrada del tubo. En las paredes la velocidad vale cero debido al rozamiento y se desarrolla una capa límite sobre las paredes del tubo, como se puede apreciar en la Figura 1.

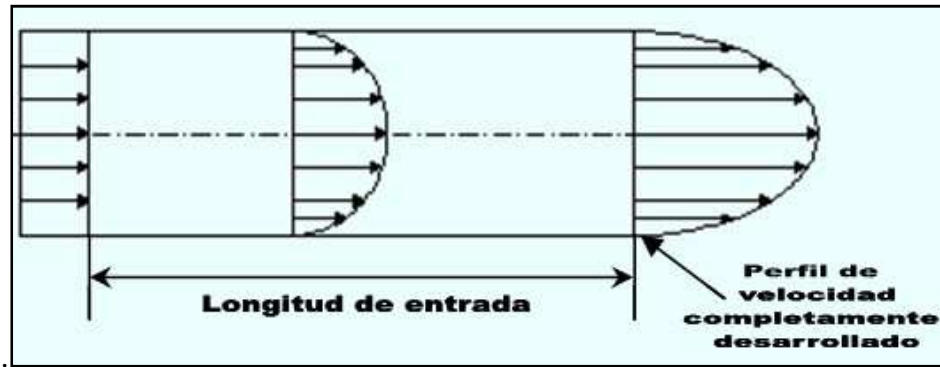


Figura 1: Desarrollo del perfil de velocidades de un fluido en un tubo.

Para un flujo completamente desarrollado a través de un tubo recto de área constante ( $y_1 = y_2$ ), y con  $v_1 = v_2$ , las pérdidas mayores de carga se pueden expresar como una pérdida de presión.

$$h_{1 \rightarrow 2} = \left( \frac{\Delta P}{\rho} \right) \quad (\text{ec. 10})$$

Las pérdidas de carga representan la energía mecánica que se transforma en energía térmica por efecto del rozamiento, dicha pérdida de carga para el caso de un flujo completamente desarrollado a través de un conducto de sección transversal constante depende únicamente de las características del flujo.

La naturaleza del flujo a través de un tubo está determinada por el valor que tome el número de Reynolds (ec. 11) siendo este un número adimensional que depende de la densidad, viscosidad y velocidad del flujo y el diámetro del tubo. Se define como:

$$R_e = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad (\text{ec. 11})$$

Donde:

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido  $\left( \frac{\text{Kg m}}{\text{s}} \right)$ .

$D$ : Diámetro de la tubería o longitud característica del sistema ( $\text{m}$ ).

$v_s$ : Velocidad característica del fluido  $\left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ .

Si el flujo es laminar  $R_e < 2300$  y si el flujo es turbulento  $R_e > 2300$ , en la Figura 2 se puede apreciar los tipos de flujo.



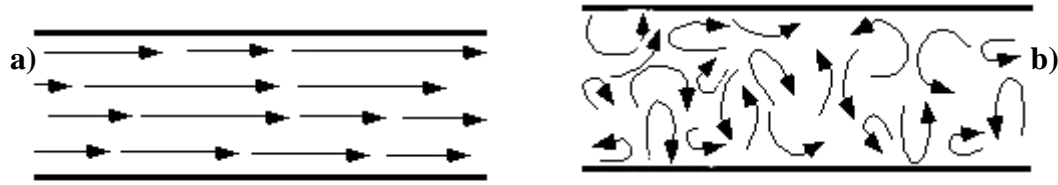


Figura 2: Flujo laminar (a) y flujo turbulento (b).

Para el cálculo de pérdidas de carga en conductos rectos y largos, tanto para flujo laminar como turbulento se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach (ec.12). La diferencia entre ambos tipos de flujo está en la definición y evaluación del factor de fricción.

$$h_{1\rightarrow 2} = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (\text{ec. 12})$$

Donde:

$f$ : Factor de fricción.

$L$ : Longitud de la tubería ( $m$ ).

El factor de fricción es un parámetro adimensional que depende de la velocidad, el diámetro de tubería, las propiedades del fluido, densidad y viscosidad, y de la rugosidad de la superficie del conducto, la cual depende del tipo de material y del acabado del mismo.

Para flujos laminares se cumple la ley de Poiseuille (ec. 13), en la cual se determinan las pérdidas de carga para flujos laminares de un fluido de viscosidad constante que es independiente de la velocidad del fluido.

$$h_{1\rightarrow 2} = \frac{32\mu Lv}{\rho g D^2} \quad (\text{ec. 13})$$

Comparando el número de Reynolds (ec. 11), la ley de Darcy-Weisbach (ec. 12), y la ley de Poiseuille (ec. 13), se obtiene el valor del factor de fricción para flujos laminares (ec. 15); en la cual se puede observar que el factor de fricción para fluidos

laminares depende de las propiedades del fluido (densidad y viscosidad) y no de la rugosidad de la superficie del conducto.

$$h_{1 \rightarrow 2} = \left( \frac{64}{Re} \right) \frac{Lv^2}{2Dg}$$

(ec. 14)

$$f = \left( \frac{64}{Re} \right) \quad (\text{ec. 15})$$

Para determinar el factor de fricción para flujos turbulentos se utilizan

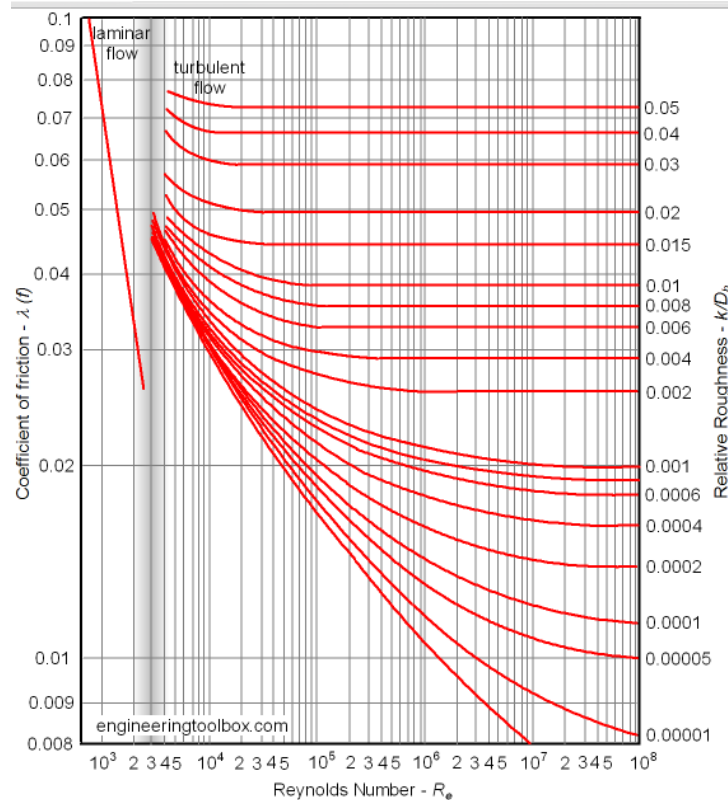
- Uso de correlaciones (Tabla 3).
- Diagrama de Moody (Figura 3).

Para flujos turbulentos, el factor de fricción depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa del conducto ( $k$ ). En la Tabla 3 se muestran rugosidades tipo utilizadas en función del material del conducto:

Tuberías	Régimen	Autor	Fórmula
Lisas	Turbulento $2300 < Re < 100000$	Blasius	$f = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}}$
Lisas	Turbulento $Re > 100000$	Karmán-Prandtl (1ª ecuación)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f} - 0.8)$
Rugosas	Turbulento $2300 < Re < 100000$	Colebrook-White	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$
Rugosas	Turbulento $Re > 100000$	Karmán-Prandtl (2ª ecuación)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{D}{2k} + 1.74$

**Tabla 3: Correlaciones en función del material del conducto ( $k$ : rugosidad del conducto) y del número de Reynolds.**

El diagrama de Moody (Figura 3) es la representación en escala logarítmica, de la ecuación de Poiseuille (ec. 13) y de la ecuación de Colebrook-White (Tabla 3), y permite determinar el valor de  $f$  en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa.



**Figura 3: Diagrama de Moody.**

#### 4.3.2 Pérdidas menores

Las pérdidas menores o secundarias son las pérdidas que tienen lugar en las transiciones, estrechamiento o expansiones, en codos, válvulas y en toda clase de accesorios de tuberías.

La pérdida de carga menor puede expresarse como:

$$h_s = K \frac{v^2}{2g} \quad (\text{ec. 16})$$

Donde:

$h_s$ : Pérdidas de carga menores.

$K$  : Coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria (Figura 4).

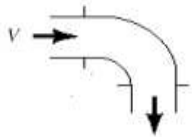
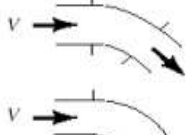
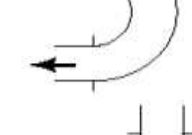
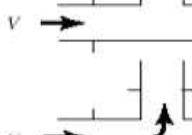
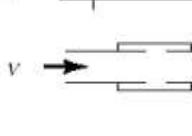


Component	K	
a. TUBOS ACODADOS		
Regular de 90°, embridado	0.3	
Regular de 90°, roscado	1.5	
De 90° con gran radio, embridado	0.2	
De 90° con gran radio, roscado	0.7	
De 45° con gran radio, embridado	0.2	
Regular de 45°, roscado	0.4	
b. CODOS DE 180°		
Codo de 180°, embridado	0.2	
Codo de 180°, roscado	1.5	
c. CONEXIONES EN T		
Flujo de línea, embridado	0.2	
Flujo de línea, roscado	0.9	
Flujo derivado, embridado	1.0	
Flujo derivado, roscado	2.0	
d. UNION ROSCADA	0.08	
e. VALVULAS		
De globo, completamente abierta	18	
De ángulo, completamente abierta	2	
De compuerta, completamente abierta	0,15	
De compuerta, 1/4 cerrada	0,26	
De compuerta, 1/2 cerrada	2,1	
De compuerta, 3/4 cerrada	17	
De retención a bisagra, flujo hacia adelante	2	
De retención a bisagra, flujo hacia atrás	infinito	
De bola, completamene abierta	0,05	
De bola, 1/3 cerrada	5,5	
De bola, 2/3 cerrada	2,15	

Figura 4: Coeficientes adimensionales de pérdida de carga secundaria [3].

## **Capítulo 5**

# **Medidores de caudal**

---

## 5.1 Medidor de caudal

Un medidor de caudal es un instrumento destinado a medir, memorizar y poner en el visor en forma continuada el volumen de agua que pasa a través del transductor de medición en condiciones de ser medido.

Aunque los dispositivos que se emplean para la medición de los caudales no ejercen ningún efecto de depuración sobre las aguas residuales, juegan un papel muy importante en el global del proceso pues permiten la determinación de los caudales de aguas a tratar y los realmente tratados. Esto posibilita, a su vez, ajustar las condiciones operativas de las distintas etapas del tratamiento, así como obtener el coste del tratamiento por unidad de volumen tratado.

Un medidor de agua incluye, al menos, un transductor de medición, un sensor de flujo, un calculador y un dispositivo indicador.

Un transductor de medición es la parte del medidor que transforma el flujo o el volumen del agua en señales que son transferidas al calculador. Puede estar basado en principios mecánicos, eléctricos o electrónicos. Puede ser autónomo o alimentado por una fuente eléctrica exterior.

El sensor de flujo o sensor de volumen es la parte del medidor de agua que capta el volumen del agua que pasa a través del medidor.

El calculador es la parte del medidor que recibe las señales de salida del transductor y de instrumentos asociados de medición, los transforma y, si corresponde, archiva los resultados en la memoria hasta que sean usados. Además el calculador puede tener la capacidad de comunicarse en ambos sentidos con dispositivos auxiliares.

El dispositivo indicador es la parte del medidor que muestra los resultados de la medición en forma continuada o a solicitud.

Un medidor de caudal, además, suele incluir un dispositivo de ajuste, un dispositivo de corrección y varios dispositivos auxiliares.

El dispositivo de ajuste es aquel que está incorporado en el medidor de caudal, y que permite corregir la curva de error de modo que se mantenga paralela a sí misma con el objeto de limitar los errores de indicación dentro del máximo tolerado de errores.

El dispositivo de corrección es un dispositivo conectado o incorporado al medidor para corregir automáticamente el volumen en condiciones de medición, al tomar en cuenta la velocidad del flujo y las características del agua a medir, por ejemplo, temperatura y presión; y las curvas de calibración previamente establecidas. Las características del agua pueden ser medidas mediante el uso de instrumentos medidores asociados, o ser archivadas en la memoria del instrumento.

Por último los dispositivos auxiliares, los cuales están destinados a realizar una función particular, directamente relacionada con la elaboración, transmisión o exhibición de los resultados de la medición. Los principales dispositivos auxiliares son:

- Dispositivo de puesta a cero
- Dispositivo indicador remoto
- Dispositivo impresor
- Dispositivo de memoria

## **5.2 Tipos de medidores de caudal**

A continuación se van a clasificar los caudalímetros según su principio de funcionamiento.

### **5.2.1 Medidores volumétricos**

Los medidores volumétricos determinan el volumen que pasa a través de una tubería por unidad de tiempo.

A continuación clasificar de acuerdo al método de obtención del caudal.

### 5.2.1.1 Medidores deprimógenos

Se denomina así a los medidores cuya instalación produce una diferencia de presiones, pérdida de carga, que se vincula con el caudal que circula, en la ecuación de Bernoulli (ec. 8); que establece que la suma de energía cinética más la energía potencial de altura más la energía potencial debido a la presión que tiene un fluido permanece constante. De ahí se puede deducir que frente a un aumento de velocidad, por ejemplo al pasar por una restricción en la cañería, se producirá una disminución en la presión. Se puede establecer una relación entre la velocidad circulante y la diferencia de presión que se produce. Esta diferencia de presión se puede medir y de ahí determinar la velocidad. Multiplicando esa velocidad por el área de la cañería obtendremos el caudal volumétrico. Los más usados son: el Tubo Venturi, la tobera, la placa orificio o diafragma, el Tubo de Pitot y el Tubo Annubar.

#### A) El Tubo Venturi

El tubo Venturi es un dispositivo formado por una tubería corta recta, entre dos tramos cónicos se origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido.

La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así, al colocar un manómetro en la garganta se mide la caída de presión y hace posible calcular el caudal instantáneo, como se puede apreciar en la Figura 5.

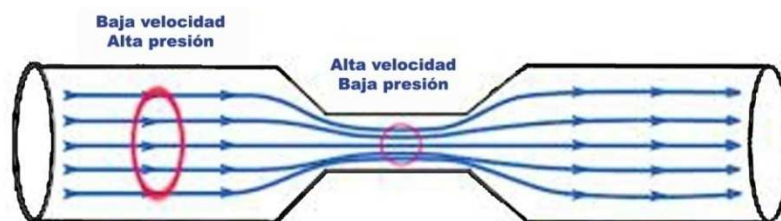
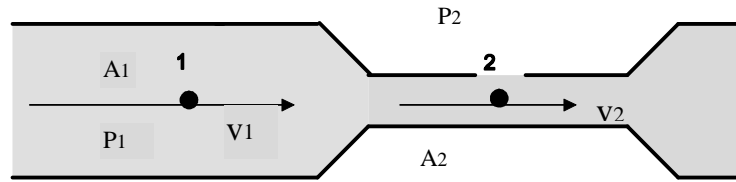


Figura 5: Tubo Venturi.

Si los dos puntos se encuentran a la misma altura ( $y_1 = y_2$ ), como se puede observar en la Figura 6, la (ec. 8) se puede escribir como:





**Figura 6: Situación de las alturas de dos puntos en el Tubo Venturi.**

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (\text{ec. 17})$$

Reordenando términos:

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \quad (\text{ec. 18})$$

Sustituyendo la (ec. 2) en la (ec. 18):

$$v_2^2 \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right) = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \quad (\text{ec. 19})$$

Despejando:

$$v_2 = A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (\text{ec. 20})$$

El flujo volumétrico es:

$$Q = v_2 A_2 = A_2 A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (\text{ec. 21})$$

Al incluir las pérdidas mayores de fricción, la (ec. 21) se puede escribir como:

$$Q_{real} = C A_2 A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (\text{ec. 22})$$

Donde:

$C$ : Coeficiente de descarga, se obtiene de curvas que son función del número de Reynolds, (Figura 7).

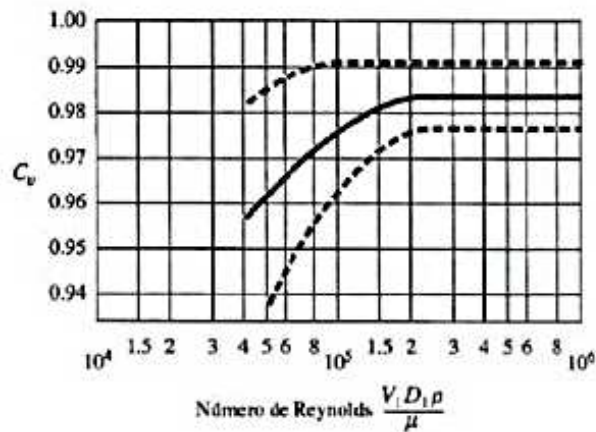


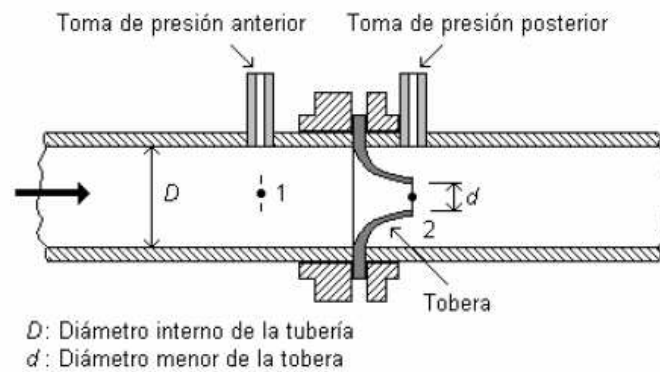
Figura 7: Coeficiente de descarga para el Tubo Venturi.

El valor del coeficiente de descarga para un medidor Venturi depende del número de Reynolds y, en menor grado, del tamaño de la relación de áreas del Tubo Venturi.  $C$  es aproximadamente constante cuando el número de Reynolds está por encima de un valor crítico, se puede aproximar a un valor de 0,984 para números de Reynolds de tubería mayores de 200000. Ese es el rango de operación normal del medidor. Por debajo de ese valor crítico de  $Re$ , donde los efectos viscosos comienzan a ser más importantes,  $C$  varía.

El Tubo Venturi posee una elevada precisión del orden de  $\pm 0,75\%$ , permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos. Presenta la desventaja de ser costoso.

## B) La tobera

La tobera consta de un tubo corto cuyo diámetro disminuye en forma gradual de un extremo al otro. También posee dos tomas de presión, una ubicada del lado anterior y otra ubicada del lado posterior de la tobera, en las que se puede conectar un manómetro de presión diferencial, como se puede apreciar en la Figura 8. Los medidores de caudal con toberas hacen uso de los mismos principios que para el Tubo de Venturi.



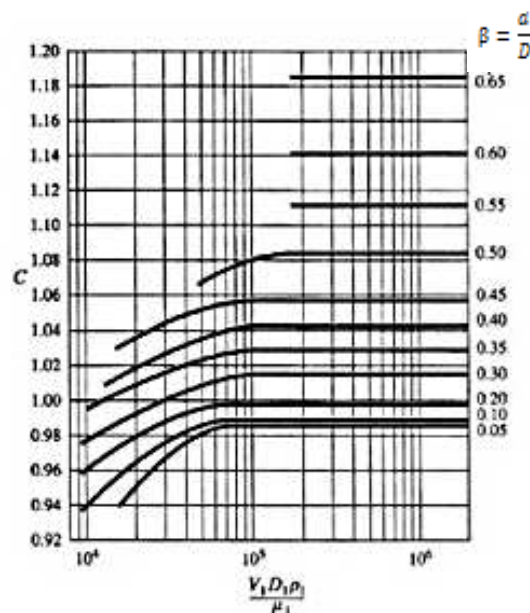
**Figura 8: Tobera.**

La ecuación del caudal para la tobera es:

$$Q_{real} = K A_2 A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \quad (\text{ec. 23})$$

Donde:

$K$ : Coeficiente de descarga, se obtiene de curvas (Figura 9) que son función del número de Reynolds y del parámetro  $\beta = \frac{d}{D}$ , que relaciona los diámetros de la tobera ( $d$ ) y del tubo ( $D$ ).



**Figura 9: Coeficiente de descarga para toberas.**

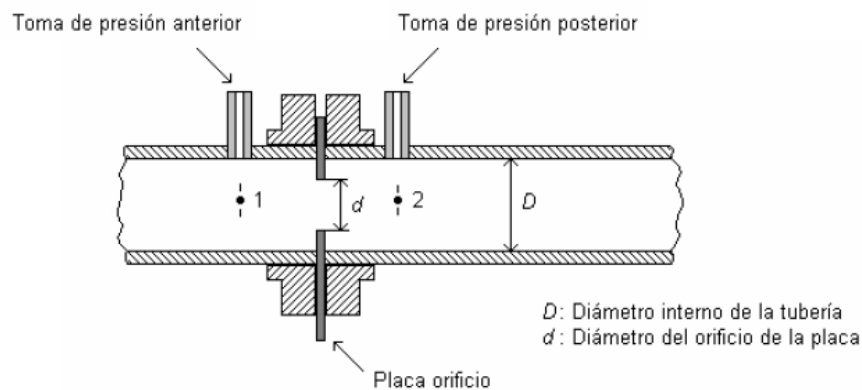
El valor del coeficiente de descarga depende primordialmente del número de Reynolds de la tubería, y en menor grado, de la relación de diámetro  $\beta$ . En general, los coeficientes varían de 0,95 a un número de Reynolds de 10000, hasta 0,99, a 1000000.

La tobera se puede emplear para medir caudal de fluidos con dos fases, de vapor o líquidos viscosos, para líquidos que tengan una pequeña cantidad de sólidos en suspensión. Sin embargo, no debe emplearse para líquidos con concentraciones de sólidos mayores que puedan llegar a obturarla.

El coste de la tobera es de 8 a 16 veces el de la placa orificio y su precisión es del orden de  $\pm 0.95\%$  a  $\pm 1,5\%$ .

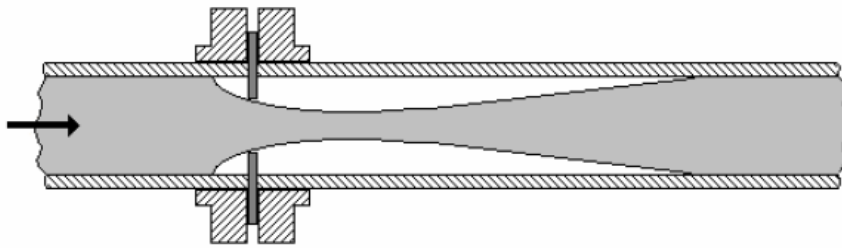
### C) Placa orificio o diafragma

La placa orificio consiste en una placa perforada ubicada en el interior de una tubería, como se puede observar en la Figura 10. Posee además, dos tomas de presión, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa, a las cuales se conecta un manómetro de presión diferencial.



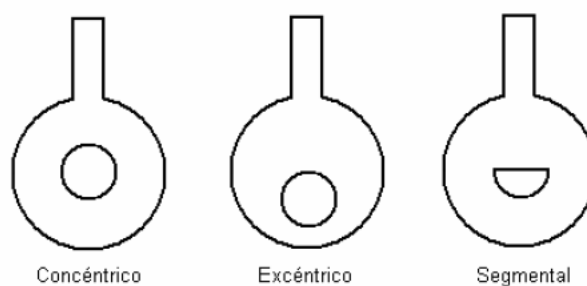
**Figura 10: Placa orificio o diafragma.**

La placa orificio hace que la obstrucción al paso del fluido por la tubería sea de forma abrupta, esto provoca que la vena fluida presente una sección inferior a la del estrechamiento que se denomina vena contracta y que se encuentra corriente abajo del mismo, como se puede apreciar en la Figura 11. El efecto de la vena contracta no sucede cuando el estrechamiento de la sección de la cañería es de forma gradual.



**Figura 11: Efecto de la vena contracta.**

El orificio de la placa puede ser concéntrico, excéntrico o segmental, como se muestra en la Figura 12. El concéntrico es el más comúnmente utilizado. El orificio de la placa es circular y concéntrico con el tubo en el que va instalado. Su exactitud es mucho mayor a la de los otros dos tipos de orificios. El excéntrico, el orificio en la placa es circular y tangente a la pared interna de la cañería en un punto. Se utiliza para fluidos con dos fases: vapor húmedo, líquidos que contienen sólidos... El segmental, es un orificio en forma de segmento circular tangente en un punto a la circunferencia interna de la cañería. Se utiliza para fluidos barrocos con la ventaja que no acumula sólidos en el lado anterior a la placa.



**Figura 12: Distintos tipos de orificios.**

La ecuación del caudal para la placa orificio es la misma que para la tobera (ec. 17), donde  $A_2$  es el área del orificio de la placa.

Por último, la precisión de la placa orificio está en el orden de  $\pm 1\%$  y  $\pm 2\%$ .

## D) Tubo de Pitot

El Tubo de Pitot puede ser definido como el instrumento para medir velocidades de un flujo mediante la diferencia de presiones estática y dinámica en una línea de corriente.

El Tubo de Pitot contiene un orificio principal por donde se mide la presión dinámica, en efecto el fluido tiene velocidad cero ( $v_2 = 0$ ) en ese punto, pero como la presión total se mantiene sobre la línea de corriente, se debe cumplir:

$$P_{Total\ 1} = P_{Total\ 2} \quad (\text{ec. 24})$$

También ocurre que todo perfil de velocidades tiene valor cero en los puntos solidarios a un objeto, sea cualquier pared de éste, por lo que se confeccionan aberturas paralelas a la dirección del flujo y están situadas lo suficientemente lejos como para que la velocidad y la presión fuera de ellas tengan los valores del flujo libre. Por lo tanto, la presión en el brazo izquierdo del manómetro, que está conectado a las aberturas, es la presión estática, agujeros al costado del tubo para medir la presión total, como se puede apreciar en la Figura 13.

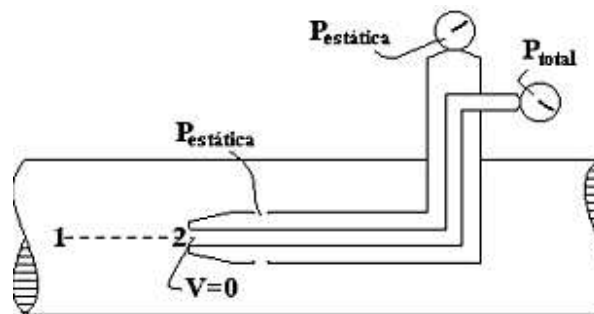


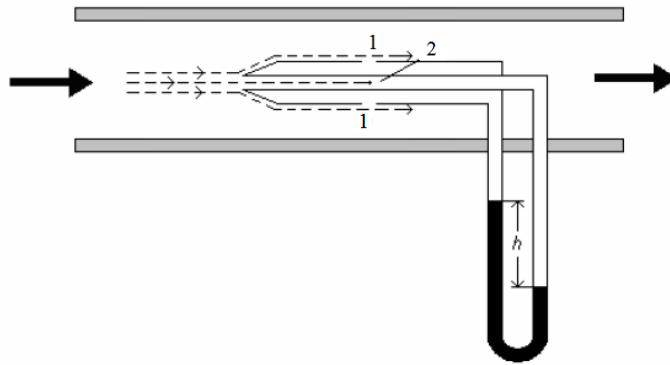
Figura 13: Tubo de Pitot.

De acuerdo con la ecuación de Bernoulli (ec. 8) en los puntos 1 y 2, situados a la misma altura ( $y_1 = y_2$ ),

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v^2 = P_2 \quad (\text{ec. 25})$$

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (\text{ec. 26})$$

Como se puede ver en la Figura 14,  $P_2$  es mayor que  $P_1$ .



**Figura 14: Funcionamiento del Tubo de Pitot.**

$$P_2 = P_1 + \rho_m g h \quad (\text{ec. 27})$$

Donde:

$h$ : Diferencia de altura del líquido en los brazos del manómetro ( $m$ ).

$\rho_m$ : Densidad del líquido manométrico ( $\frac{Kg}{m^3}$ ).

$$P_2 - P_1 = \rho_m g h \quad (\text{ec. 28})$$

Igualando la ecuación (ec. 26) y la (ec. 28):

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \rho_m g h \quad (\text{ec. 29})$$

$$v = \sqrt{\frac{2gh\rho_m}{\rho}} \quad (\text{ec. 30})$$

La ecuación del caudal para el Tubo de Pitot, sustituyendo la (ec. 30) en la (ec. 6) es:

$$Q = A \sqrt{\frac{2gh\rho_m}{\rho}} \quad (\text{ec. 31})$$

Su precisión es baja, del orden de  $\pm 1,5\%$  -  $\pm 4\%$ , y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

Al incluir las pérdidas mayores de fricción, la (ec. 31) se puede escribir como:

$$Q_{real} = CA \sqrt{\frac{2gh\rho_m}{\rho}} \quad (\text{ec. 32})$$

Donde:

$C$ : Coeficiente del tubo de Pitot, es un factor que se determina experimentalmente, y oscila entre 0,01 y 1,03. Sin embargo si el Tubo de Pitot se encuentra paralelo a las líneas de corriente toma el valor de 1.

### **E) Tubo de Annubar**

Es una variante del tubo de Pitot que dispone de varias tomas, a lo largo de la sección transversal, con lo que se mide la presión total en varios puntos, obteniendo la media de estos valores y evitando el error que produce el tubo de Pitot, teniendo por lo tanto una precisión de  $\pm 1\%$ .

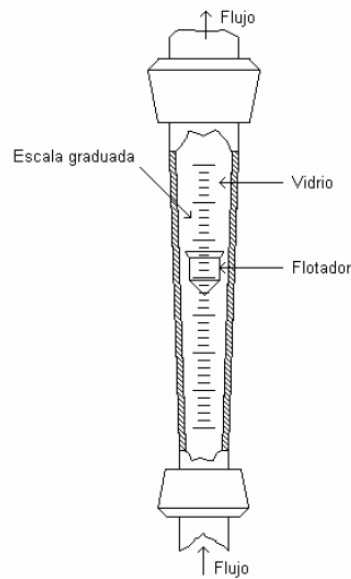
#### **5.2.1.2 Medidores de área variable**

En los medidores deprimógenos, el área de restricción era constante y la caída de presión variaba con la velocidad de flujo; en cambio en los medidores de área variable, la caída de presión permanece casi constante y el área de restricción varía.

### **A) Rotamétro**

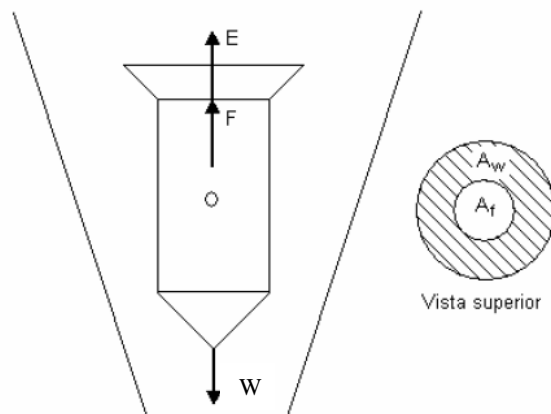
Son dispositivos cuya indicación es esencialmente lineal con el caudal. Están compuestos por dos partes principales, un tubo cónico y un flotador libre de movimiento cuya posición dentro del tubo es proporcional al flujo del fluido. La parte anterior del rotámetro es de vidrio y posee una escala graduada en la que puede leerse directamente el valor del caudal, de acuerdo a la posición del flotador, como se puede apreciar en la Figura 15.





**Figura 15: Rotámetro.**

Para un valor dado de caudal, el flotador dentro del tubo se encuentra en una posición determinada, donde las fuerzas que actúan sobre él, se encuentran en equilibrio, como se puede observar en la Figura 16.



**Figura 16: Fuerzas que actúan sobre el flotador en la condición de equilibrio.**

En esta condición de equilibrio se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$F + E - W = 0 \quad (\text{ec. 33})$$

$$W = V_f \rho_f g \quad (\text{ec. 34})$$

$$F = V_f \rho g \quad (\text{ec. 35})$$

$$E = C_D \rho A_f \frac{v^2}{2g} \quad (\text{ec. 36})$$

Donde:

$E$ : Empuje hidrostático ( $N$ ).

$W$ : Peso de flotador ( $N$ ).

$V_f$ : Volumen del flotador ( $m^3$ ).

$\rho_f$ : Densidad del flotador ( $\frac{Kg}{m^3}$ ).

$F$ : Fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador, resistencia aerodinámica ( $N$ ).

$C_D$ : Coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador, depende de la viscosidad del fluido.

$A_f$ : Área de la sección del flotador ( $m^2$ ).

Sustituyendo la (ec. 34), (ec. 35) y (ec. 36) en la (ec. 33) y despejando la velocidad se obtiene:

$$v = \sqrt{\frac{2g^2 V_f (\rho_f - \rho)}{C_D \rho A_f}} \quad (\text{ec. 37})$$

La ecuación del caudal para el rotámetro, sustituyendo la (ec. 37) en la (ec. 6) es:

$$Q = C A_W \sqrt{\frac{2g^2 V_f (\rho_f - \rho)}{\rho A_f}} \quad (\text{ec. 38})$$

Donde:

$A_W$ : Área entre la sección del flotador y la pared del tubo ( $m^2$ ).

$C$ : Coeficiente de descarga, que contiene entre otros coeficientes al coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador ( $C_D$ ). Se obtiene de curvas que son

función del número de Reynolds y de la relación entre el diámetro interno y la cabeza del flotador, como se puede apreciar en la Figura 17.

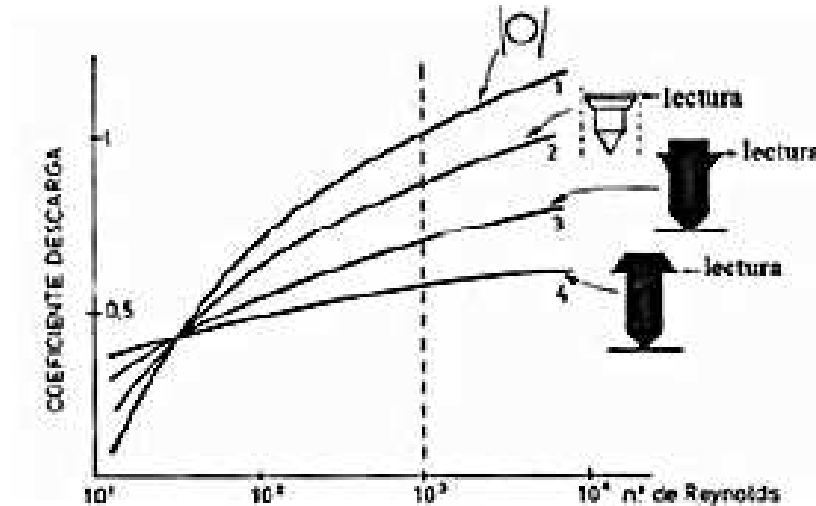


Figura 17: Coeficiente de descarga para rotámetros.

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción:

- Esférico (Figura 17 (1)): se utiliza para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico con borde plano (Figura 17 (2)): se utiliza para caudales mayores al esférico con una influencia media de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico con borde saliente de cara inclinada a favor del flujo (Figura 17 (3)): con menor influencia de la viscosidad que, por sus características de caudal, puede compararse a una tobera
- Cilíndrico con borde saliente de cara inclinada en contra del flujo (Figura 17 (4)): con mínima influencia de la viscosidad que, por su funcionamiento, es comparable a un medidor placa orificio.

Los rotámetros presentan algunas desventajas: deben ser montados en posición vertical, el flotador puede quedar no visible si el líquido empleado es opaco, no debe ser utilizado para líquidos que contengan grandes porcentajes de sólidos en suspensión y son costosos para líquidos con altas presiones y altas temperaturas. Las ventajas que

presentan son: tienen una escala uniforme en todo el rango del instrumento, la pérdida de presión es fija para todo el rango de medida, la capacidad se puede cambiar con cierta facilidad si se reemplaza el flotador o el tubo, pueden manejar líquidos corrosivos sin inconvenientes y son de fácil lectura.

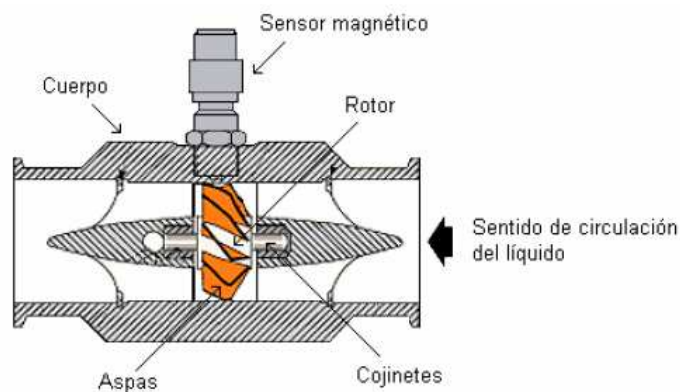
El intervalo de medida de los rotámetros es usualmente de 1 a 10, relación entre el caudal mínimo y máximo, con una escala lineal. Su precisión es del  $\pm 1\%$

### 5.2.1.3 Medidores de velocidad

Principalmente existen tres elementos para caudalímetros que basan su principio de funcionamiento en la velocidad del fluido, estos son: medidores de turbina, medidores ultrasónicos y vertederos con flotador para canales abiertos.

#### A) Medidores de turbina

Los medidores de turbina consisten en un rotor de múltiples aspas montado en una tubería, perpendicular al movimiento del líquido. El paso del líquido a través de las aspas ejerce una fuerza de rotación que hace girar al rotor a una velocidad que resulta directamente proporcional al caudal, como se puede observar en la Figura 18. La velocidad de rotación de la turbina es censada por un transductor magnético, cuya señal de salida es un tren de pulsos, los cuales pueden ser contados y totalizados. El número de pulsos contados en un período de tiempo dado, es directamente proporcional al caudal volumétrico.



**Figura 18: Medidor de turbina.**

Para captar la velocidad de la turbina existen dos tipos de transductores magnéticos:

- Reluctancia: la velocidad está determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varia la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo induciendo una corriente alterna en la bobina captadora.

- Inductivo: el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina produce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

En ambos casos, la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal, siendo del orden de 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo.

El uso de la turbina está limitado por la viscosidad del fluido, cuando aumenta la viscosidad, cambia la velocidad del perfil del líquido a través de la tubería. En las paredes del tubo el fluido se mueve más lentamente que en el centro, de modo que, las puntas de las aspas no pueden girar a mayor velocidad. Para viscosidades superiores a  $0,03 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  o  $0,05 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$  se reduce el intervalo de medida del instrumento. Es adecuado para la medida de caudales de líquidos limpios y filtrados.

Su precisión es muy elevada, está en el orden de  $\pm 0,3\%$ .

## **B) Caudalímetros ultrasónicos**

La medición del caudal se realiza por medio de una onda sonora ultrasónica que se propaga a través del líquido. Constan básicamente de dos transductores piezoeléctricos, uno actúa como transmisor y otro como receptor de la onda sonora. Ambos transductores se ubican en los lados opuestos de la cañería. Para utilizar este tipo de caudalímetros, es necesario conocer la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en el líquido al cuál se quiere medir el caudal. Entre los caudalímetros ultrasónicos se encuentran el de tiempo de tránsito y el efecto Doppler.

Algunas de las ventajas que presentan los caudalímetros ultrasónicos son: no ofrecen obstrucción al paso del fluido, no son invasivos, son resistentes a la corrosión, el Doppler se puede instalar fuera de la tubería, tienen un bajo consumo de energía, etc.

La precisión de éste tipo de caudalímetros está en el orden del  $\pm 2\%$ .

Se dotará a cada sensor ubicado a la intemperie de un protector térmico de diámetro adecuado para evitar la interferencia con la emisión-recepción del sonido. Si no se trata del propio suministrado por el fabricante, se construirá en chapa de acero inoxidable con recubrimiento interior de un material de aislante térmico como el armaflex de 1 cm.

En cuanto a su instalación, se respetará la distancia de bloqueo bajo el sensor, entre 300 mm. y 500 mm. dependiendo de los modelos; se cuidará una perfecta verticalidad del sensor y se tendrá en cuenta el ángulo de emisión del sonido para colocarlo en un lugar sin elementos que interfieran: paredes, agitadores, bombas...

### \* Caudalímetros de tiempo de tránsito

El transmisor y el receptor se ubican uno de cada lado de la cañería como se muestra en la Figura 19. El transmisor envía una onda de sonido pulsante de una frecuencia determinada, y se mide el tiempo en que la onda tarda en llegar al receptor.

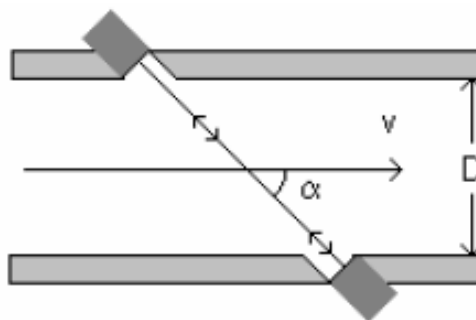


Figura 19: Caudalímetro de tiempo de tránsito.

La ecuación de la velocidad del fluido para el caudalímetro de tiempo de tránsito en función de la velocidad de propagación de la onda sonora en el fluido es:

$$v = \frac{c^2 \operatorname{tg}(\alpha)}{2D} \Delta t \quad (\text{ec. 39})$$

Donde:

$C$ : Velocidad del sonido en el fluido  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .

$\alpha$ : Ángulo del haz del sonido con relación al eje longitudinal de la tubería ( $^\circ$ ).

$D$ : Diámetro interior de la tubería ( $m$ ).

$\Delta t$ : Tiempo de vuelo de la onda del transmisor al receptor ( $s$ ).

La ecuación del caudal para el medidor en tiempo de vuelo, sustituyendo la (ec. 39) en la (ec. 6) es:

$$Q = A \frac{c^2 \operatorname{tg}(\alpha)}{2D} \Delta t \quad (\text{ec. 40})$$

### \* Caudalímetros de efecto Doppler

La velocidad del fluido se determina midiendo el corrimiento de frecuencia que experimenta la señal de retorno al reflejarse en partículas contenidas en el fluido, como se puede apreciar en la Figura 20. El empleo de éste caudalímetro está limitado a fluidos que contengan partículas sólidas en suspensión, pero permite medir algunos caudales de fluidos tales como mezclas gas-líquido, fangos....

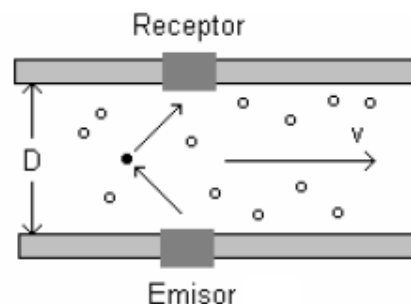


Figura 20: Caudalímetro de efecto Doppler.

La velocidad del fluido se puede expresar como:

$$v = \frac{c(f_r - f_f)}{2 \cos(\alpha)} \quad (\text{ec. 41})$$

Donde:

$f_r$ : Frecuencia de la onda recibida (Hz).

$f_t$ : Frecuencia de la onda transmitida (Hz).

La ecuación del caudal para el medidor en efecto Doppler, sustituyendo la (ec. 41) en la (ec. 6) es:

$$Q = A \frac{c(f_r - f_f)}{2 \cos(\alpha)} \quad (\text{ec. 42})$$

### C) Vertedero con flotador para canales abiertos

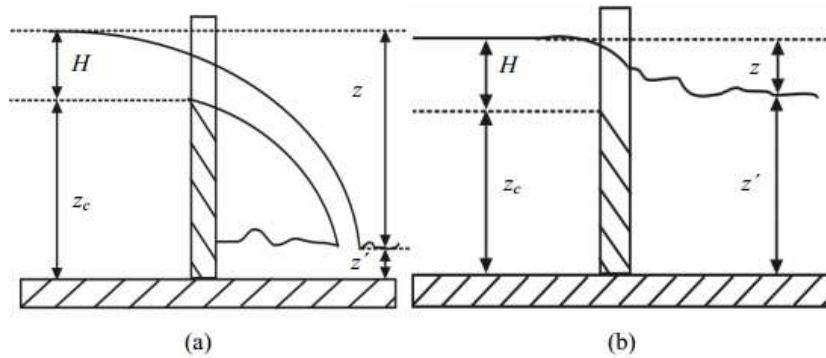
Un vertedero es un dique o pared que intercepta una corriente de un líquido con superficie libre, causando una elevación del nivel del fluido aguas arriba de la misma.

Los vertederos se emplean bien para controlar ese nivel, es decir, mantener un nivel aguas arriba que no exceda un valor límite, o bien para medir el caudal circulante por un canal. Como vertedero de medida, el caudal depende de la altura de la superficie libre del canal aguas arriba, además de depender de la geometría; por ello, un vertedero resulta un medidor sencillo pero efectivo de caudal en canales abiertos.

Los vertederos pueden clasificarse de la siguiente manera:

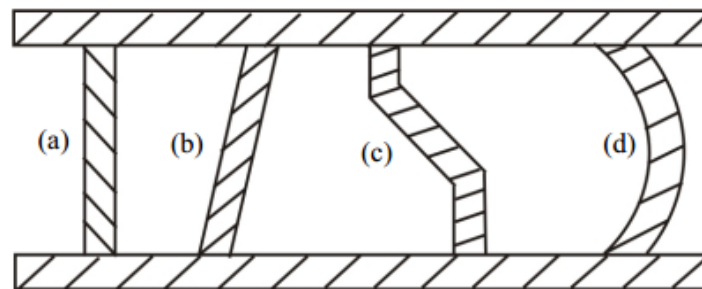
- Según la altura de la lámina de fluido aguas abajo: vertederos de lámina libre si  $z' < z_c$  (Figura 21a), y vertederos sumergidos si  $z' > z_c$  (Figura 21b).





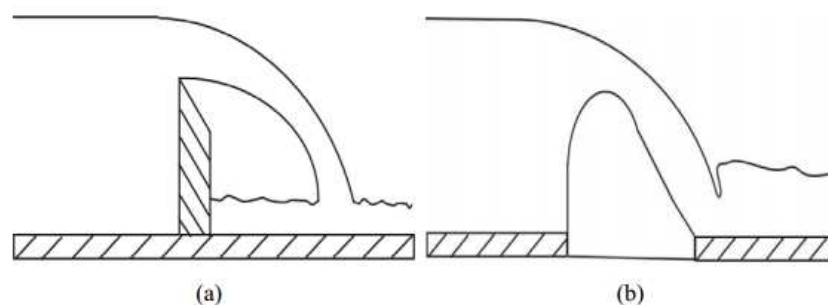
**Figura 21: Vertedero de lámina libre (a). Vertedero sumergido (b).**

- Según la disposición en planta del vertedero con relación a la corriente: vertederos normales (Figura 22a), vertederos inclinados (Figura 22b), vertederos quebrados (Figura 22c) y vertederos curvilíneos (Figura 22d).



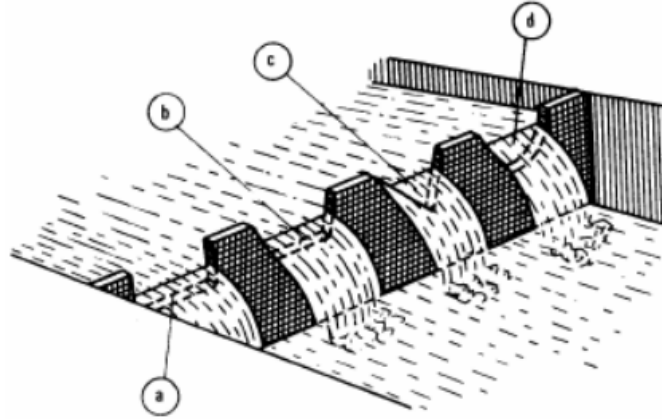
**Figura 22: Vertedero normal (a). Vertedero inclinado (b). Vertedero quebrado (c). Vertedero curvilíneo (d).**

- Según el espesor de la cresta o pared: vertederos de cresta afilada (Figura 23a) sirven para medir caudales con gran precisión; y vertederos de cresta ancha (Figura 23b) se utilizan normalmente para desaguar como parte de una presa o de otra estructura hidráulica, para el control del nivel.



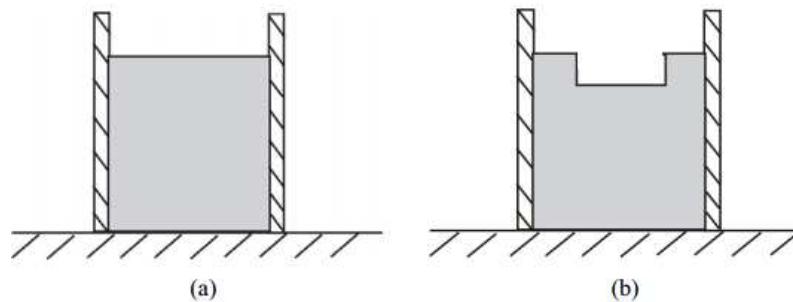
**Figura 23: Vertedero de cresta afilada (a). Vertedero de cresta ancha (b).**

Los vertederos de cresta afilada se pueden clasificar según la forma de la abertura en: rectangulares (Figura 24a), trapezoidales (Figura 24b), triangulares (Figura 24c) y parabólicos o circulares (Figura 24d), raramente utilizados.



**Figura 24: Vertedero rectangular (a). Vertedero trapezoidal (b). Vertedero triangular (c). Vertedero parabólico (d).**

A su vez, los vertederos rectangulares se clasifican en vertederos sin contracción lateral, si el ancho del vertedero es igual al ancho del canal (Figura 25a) y vertederos con contracción lateral en caso contrario (Figura 25b), normalmente utilizados como aforador y no como medidores de caudal.



**Figura 25: Vertedero sin contracción lateral (a). Vertedero con contracción lateral (b).**

Para la medida de caudal con vertederos, la precisión de la medida solamente se puede garantizar si el vertedero está bien ventilado en la zona de descarga, por el lado de aguas abajo. La ventilación o aireación tiene por objeto introducir aire bajo la lámina de agua vertida, de modo que se encontrará a presión atmosférica tanto por arriba como por abajo y así la presión estática de todos los puntos de la lámina de agua a partir de la

vertical del vertedero será igual a la presión atmosférica. Si, en cambio, el vertedero no está ventilado, como las líneas de corriente se van curvando en torno a la cresta del vertedero, se produce una depresión sobre la zona posterior de la pared del vertedero, con lo que el agua tiende a pegarse a la pared. El efecto final de esta succión es que en conjunto la lámina de líquido sobre el vertedero baja de nivel y, en definitiva, la relación entre el caudal y la altura de la superficie libre aguas arriba se modifica. Para evitar este efecto no deseado basta con disponer un tubo de suficiente diámetro entre la zona posterior de la pared del vertedero y la atmósfera exterior, pues la succión interior será suficiente para generar una entrada de aire continua.

### \* Vvertedero de cresta afilada rectangular sin contracción lateral

Aguas arriba del vertedero que se muestra en la Figura 26, punto 1, se supone que la velocidad es insignificante ( $v_1 \approx 0$ ) y en el punto 2, en la vena contracta, se supone que las líneas de corriente son paralelas, es decir, que no existe variación de la presión a través de la vena, por lo que la presión es la atmosférica ( $P_2 = P_{atm} \approx 0$ ). Planteando entonces la ecuación de Bernoulli (ec. 8) en los puntos 1 y 2, y despreciando las pérdidas, se obtiene:

$$P_1 + \rho g y_1 = \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (\text{ec. 43})$$

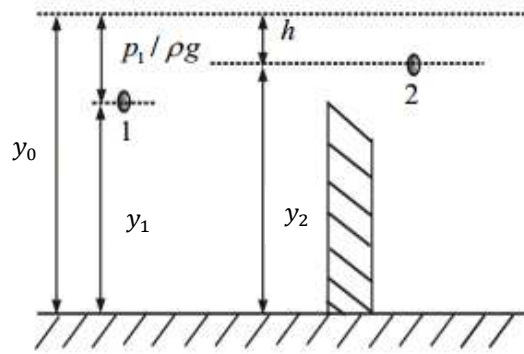
De acuerdo a la Figura 26:

$$P_1 + \rho g y_1 = \rho g y_0 \quad (\text{ec. 44})$$

$$y_0 - y_2 = h \quad (\text{ec. 45})$$

Donde:

$h$ : Diferencia de alturas entre los puntos 1 y 2 (m).

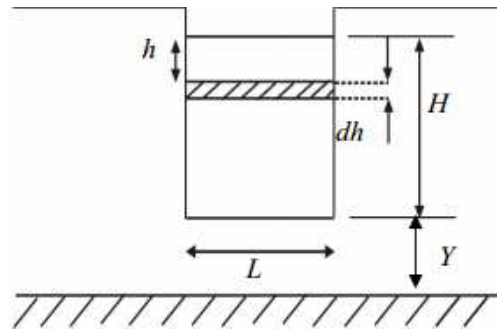


**Figura 26: Vista lateral de un vertedero rectangular de cresta afilada sin contracción lateral.**

Sustituyendo la (ec. 44) y la (ec. 45) en la (ec. 43) se obtiene la velocidad en la vena contracta:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (\text{ec. 46})$$

Sustituyendo la (ec. 46) en la (ec. 6), el caudal teórico a través de un elemento de área diferencial como el mostrado en la Figura 27, es:



**Figura 27: Vista frontal de un vertedero rectangular de cresta afilada sin contracción lateral.**

$$Q = v_2 dA = v_2 L dh \quad (\text{ec. 47})$$

Donde:

$dh$ : Espesor diferencial (m).

$L$ : Ancho del vertedero (m).

Integrando la (ec. 47) entre 0 y  $H$ , se obtiene:

$$Q = L\sqrt{2g} \int_0^H h^{\frac{1}{2}} dh = \frac{2}{3} L\sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{ec. 48})$$

Donde:

$H$ : Altura de la cresta rectangular( $m$ ).

Las pérdidas provocadas por la fricción se contabilizan introduciendo en la (ec. 48) un coeficiente corrector de descarga ( $C_D$ ).

$$Q_{real} = \frac{2}{3} C_D L\sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{ec. 49})$$

El coeficiente corrector de descarga se calcula empíricamente, pero una relación empírica ampliamente aceptada es la relación de Rehbock [7] (ec. 50).

$$C_D = 0,602 + 0,0832 \frac{H}{Y} \quad (\text{ec. 50})$$

Donde:

$Y$ : Altura del vertedero ( $m$ ).

### \* Vertedero de cresta afilada triangular

Este tipo de vertedero se emplea con frecuencia para medir caudales pequeños, inferiores aproximadamente a  $6 \frac{l}{s}$ . En la Figura 28 se muestra un esquema de la geometría de este tipo de vertedero.

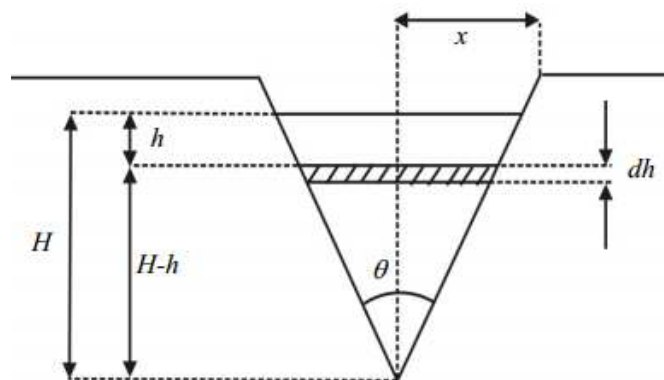


Figura 28: Vertedero triangular.

Procediendo de manera totalmente análoga al caso del vertedero rectangular sin contracción lateral, se obtiene la velocidad en la vena contracta (ec. 46), por lo tanto el caudal teórico (ec. 6) vendrá dado por:

$$Q = v_2 dA = v_2 2x dh \quad (\text{ec. 51})$$

$$tg \frac{\theta}{2} = \frac{x}{H-h} \quad (\text{ec. 52})$$

Donde:

$\theta$ : Ángulo del vertedero triangular ( $^\circ$ ). Puede tomar cualquier valor, aunque es muy frecuente el vertedero con  $\theta = 90^\circ$ .

Sustituyendo la (ec. 52) en la (ec. 51), e integrando entre 0 y  $H$ , el caudal teórico es:

$$Q = 2\sqrt{2g}tg \frac{\theta}{2} \int_0^H (H-h)h^{\frac{1}{2}}dh = \frac{8}{15}\sqrt{2g}tg \frac{\theta}{2}H^{\frac{5}{2}} \quad (\text{ec. 53})$$

El caudal real teniendo en cuenta el coeficiente corrector de descarga es:

$$Q_{real} = C_D \frac{8}{15}\sqrt{2g}tg \frac{\theta}{2}H^{\frac{5}{2}} \quad (\text{ec. 54})$$

Los valores del coeficiente corrector de descarga (Tabla 4) según [7], son:

Ángulo $\theta$	$C_D$
15°	0,52 – 0,75
30°	0,59 – 0,72
45°	0,59 – 0,69
60°	0,50 – 0,54
90°	0,50 – 0,60

**Tabla 4:** Valores del coeficiente de descarga para vertederos triangulares [7].

### \* Vertedero de cresta afilada trapezoidal

Este tipo de vertedero es menos común en su uso como medidor de caudales, normalmente es utilizado como aforador de canales. En la Figura 29 se muestra un esquema de la geometría de este tipo de vertedero.

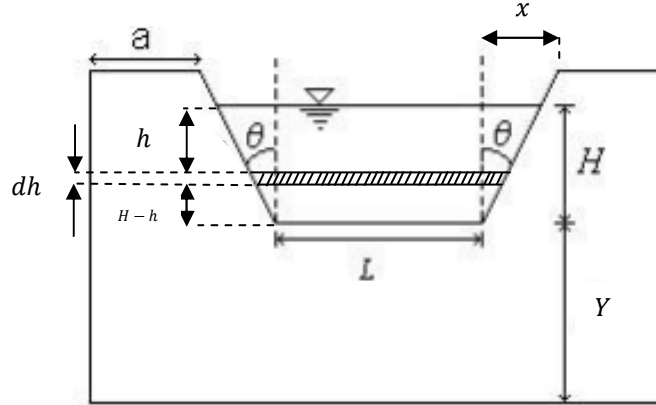


Figura 29: Vertedero trapezoidal.

Procediendo de manera totalmente análoga al caso del vertedero rectangular sin contracción lateral, se obtiene la velocidad en la vena contracta (ec. 46). El vertedero trapezoidal es un conjunto del vertedero rectangular y triangular, por lo tanto el caudal teórico (ec. 6) vendrá dado por:

$$Q = v_2 dA = v_2 L dh + v_2 2x dh \quad (\text{ec. 55})$$

$$\text{tg} \theta = \frac{x}{H-h} \quad (\text{ec. 56})$$

Sustituyendo la (ec. 56) en la (ec. 55), e integrando entre 0 y  $H$ , el caudal teórico es:

$$Q = L\sqrt{2g} \int_0^H h^{\frac{1}{2}} dh + 2\sqrt{2g} \text{tg} \theta \int_0^H (H-h) h^{\frac{1}{2}} dh \quad (\text{ec. 57})$$

$$Q = \frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} + \frac{8}{15} \sqrt{2g} \text{tg} \theta H^{\frac{5}{2}} \quad (\text{ec. 58})$$

El caudal real teniendo en cuenta el coeficiente corrector de descarga, es:

$$Q_{\text{real}} = C_{D1} \frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} + C_{D2} \frac{8}{15} \sqrt{2g} \text{tg} \theta H^{\frac{5}{2}} \quad (\text{ec. 59})$$

Donde:

$C_{D1}$ : Coeficiente de descarga para vertederos rectangulares (ec. 44).

$C_{D2}$ : Coeficiente de descarga para vertederos triangulares (Tabla 4).

### \* Canal Parshall

Entre los medidores de canal abierto el más utilizado es el canal Parshall. El canal Parshall es un tipo de Venturi, consistiendo en un canal de entrada con convergencia de las paredes y base; un cuello con paredes paralelas y base inclinada hacia abajo y un canal de salida con paredes divergentes y base inclinada hacia arriba, como se puede apreciar en la Figura 30.

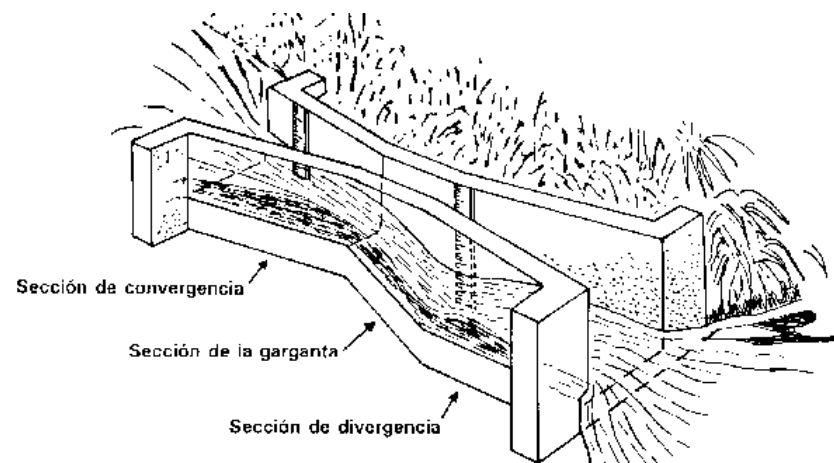


Figura 30: Canal Parshall.

El caudal del Canal Parshall es:

$$Q = KH^n \quad (\text{ec. 60})$$

Donde:

$K$ : Coeficiente de longitud del aforador, que depende de la dimensión del caudal (Tabla 5).

$H$ : Altura de la lámina de agua medida a  $\frac{2}{3}$  de la sección convergente.

$n$ : Constante que depende de la dimensión del caudal (Tabla 5).



Ancho de la Garganta	Valores de K y n	
W (mm)	K	n
25,4	0,001352	1,55
50,8	0,002702	
76,2	0,003965	
152,4	0,006937	1,58
228,6	0,013762	1,53
W (m)	K	n
0,3048	0,69	1,52
0,4572	1,06	1,54
0,6096	1,43	1,55
0,9144	2,18	1,57
1,2192	2,95	1,58
1,524	3,23	1,59
1,6288	4,52	1,6
2,1336	5,31	
2,4384	6,11	1,61
3,048	7,46	1,6
3,658	9,96	
4,572	10,96	
6,096	14,45	
7,62	17,94	
9,144	21,44	
12,192	28,43	
15,24	35,41	

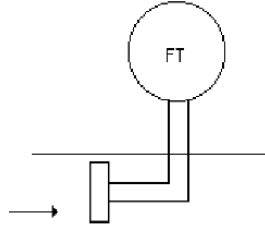
Tabla 5: Constantes del Canal Parshall [5].

#### 5.2.1.4 Medidor de fuerza

##### A) Placa de impacto

El medidor de placa consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje del fluido, como se puede apreciar en la Figura 31. La placa está conectada a un transmisor de equilibrio de fuerzas piezoresistivo. La fuerza dinámica del fluido sobre la placa es transmitida a través de una palanca a un puente de Wheatstone de cuatro galgas extensiométricas activas que proporciona una señal de salida de 4 – 20 mA c.c. compatible con el protocolo HART. Esta señal es proporcional

a la fuerza de impacto del fluido sobre la placa y, a su vez, el caudal es proporcional a la raíz cuadrada del caudal, siendo independiente de la temperatura del fluido o de su presión estática.



**Figura 31: Medidor placa de impacto**

La fuerza originada por el fluido [8] es:

$$F = \frac{v^2}{2g} \rho C_D A \quad (\text{ec. 61})$$

Donde:

$A$ : Área de la placa ( $m^2$ ).

$v$ : Velocidad del fluido ( $\frac{m}{s}$ ).

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\frac{Kg}{m^3}$ ).

$C_D$ : Coeficiente experimental de rozamiento del disco. El valor es 1,28 para placas planas y de 0,07 a 0,5 para esferas.

$$v = \sqrt{\frac{2gF}{\rho C_D A}} \quad (\text{ec. 62})$$

La ecuación del caudal se obtiene, sustituyendo la (ec. 62) en la (ec. 6):

$$Q_{real} = A \sqrt{\frac{2gF}{\rho C_D A}} \quad (\text{ec. 63})$$

Donde:

$A$ : Área de la tubería sección interior de la tubería ( $m^2$ ).

El instrumento permite medir caudales de fluidos sucios o corrosivos y fluidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión. De hecho, puede medir caudales de un mínimo de  $0,3 \frac{l}{min}$  hasta  $40000 \frac{l}{min}$ .

Tiene una alta fiabilidad y su vida útil alcanza los 20 millones de ciclos. La precisión de éste tipo de caudalímetros está en el orden de  $\pm 1\%$ .

Su desventaja es la pérdida de carga producida por la placa.

### 5.2.1.5 Tensión inducida

#### A) Medidor magnético

La ley de Faraday (ec. 64) establece que, la tensión inducida a través de un conductor, al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

$$E_s = -N \frac{d\varphi}{dt} = Blv \quad (\text{ec. 64})$$

$$v = \frac{E_s}{Bl} \quad (\text{ec. 65})$$

Donde:

$\varphi$ : Flujo magnético ( $Wb$ ).

$N$ : Número de espiras.

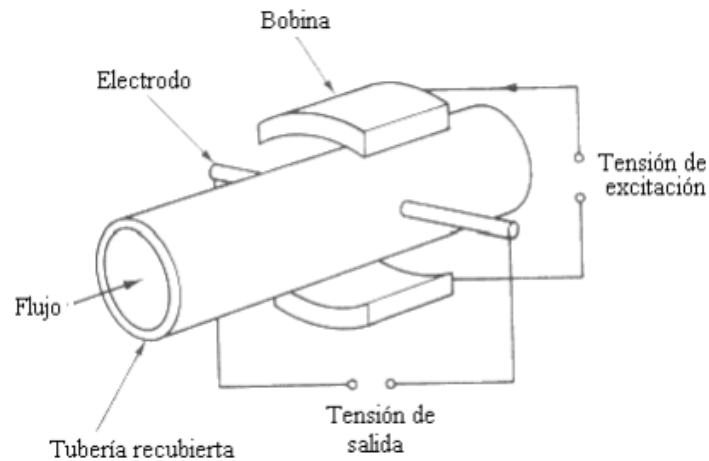
$E_s$ : Tensión generada en el conductor ( $V$ ).

$B$ : Densidad del campo magnético ( $T$ ).

$l = D$ : Distancia entre los electrodos ( $m$ ).

$v$ : Velocidad del fluido ( $\frac{m}{s}$ ).

El medidor magnético, mostrado en la Figura 32, consiste en un tubo cilíndrico de acero inoxidable, el cual transporta el fluido a medir. Una fuerza magnética es creada en el tubo mediante la polarización de dos electrodos insertados a ambos lados del tubo.



**Figura 32: Medidor magnético.**

Sustituyendo la (ec. 65) en la (ec. 6), el caudal teórico es:

$$Q = \frac{E_s}{BD} \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{ec. 66})$$

El diámetro interno del medidor de flujo magnético es normalmente el mismo que el del resto del conducto del sistema. Por lo tanto, no hay obstrucción del fluido y consecuentemente, no hay pérdida de presión asociada a la medida. Al igual que otras formas de medida, este instrumento requiere un tramo recto inmediatamente antes del punto donde se realiza la medida para cierta exactitud en la medida, aunque una longitud igual a cinco veces del diámetro puede ser suficiente.

La (ec. 64) indica que la señal  $E_s$  depende de la velocidad del fluido y de la densidad del campo magnético  $B$  la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido. Para obtener una señal que dependa únicamente de la velocidad, se deben eliminar la influencia del resto de parámetros. De aquí que la señal de tensión del medidor se compara en el receptor con una tensión de referencia  $E_r$ . Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético  $B$ , la tensión de la línea y las variaciones de temperatura y de conductividad del líquido no influyen en la precisión de la medida.

La señal de referencia  $E_r$  se toma de un arrollamiento colocado en los bobinados del campo que generan el flujo magnético. En la Figura 33 puede verse un esquema de conexiones del elemento de medida.

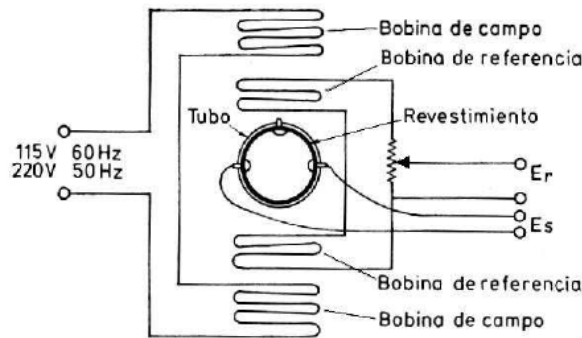


Figura 33: Esquema de conexiones de un medidor magnético.

El valor de  $E_r$  se escoge de tal forma que la relación  $\frac{E_s}{E_r}$  se hace constante en todos los medidores de caudal.

La conductividad del fluido es la única característica propia del líquido que puede limitar el empleo del medidor magnético de caudal. El sistema electrónico utilizado en el elemento y en el receptor permite medir caudales de líquidos que tengan una conductividad superior a  $5 \frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}}$ . No obstante, en casos especiales puede trabajarse con valores menores, añadiendo al circuito de medida un preamplificador adicional, acondicionador de señal, alcanzándose una conductividad mínima de  $0,3 \frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}}$ .

Los medidores magnéticos del caudal son adecuados para la medida de caudales de líquidos conductores en particular los líquidos fangosos y fluidos corrosivos. Pueden medir caudales en ambos sentidos del fluido en la tubería, además este medidor es no invasivo pues no tiene elementos que obstruyan el paso del fluido en la tubería, y además no posee partes móviles, lo que facilita su mantenimiento. Poseen una elevada precisión, del orden del  $\pm 0.1\%$ .

En contraposición son relativamente pesados, especialmente en tamaños grandes, además se requiere un cuidado especial en la instalación eléctrica y son afectados por el campo magnético generado por motores y otros equipos.

### 5.2.1.6 Medidores de desplazamiento positivo

Los medidores de desplazamiento positivo miden el caudal volumétrico contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas de éstos instrumentos se mueven aprovechando la energía del fluido en movimiento. La precisión depende de los espacios entre las partes móviles y las fijas y aumenta con la calidad de la mecanización y con el tamaño del instrumento.

Dentro de los medidores de desplazamiento positivo se encuentran: el medidor de disco giratorio y el medidor de pistón alternativo.

#### A) Medidor de disco giratorio

El instrumento está compuesto por una cámara circular con un disco plano móvil el cual posee una ranura en la que está intercalada una placa fija, como se puede apreciar en la Figura 34. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. La cara baja del disco está siempre en contacto con la parte inferior de la cámara, mientras que su parte superior roza con la parte superior de la cámara en el lado opuesto. De este modo la cámara está dividida en compartimientos separados de volumen conocido.

Cuando pasa el fluido, el disco toma un movimiento de giro inclinado y su eje transmite el movimiento a un tren de engranajes de un contador mecánico.

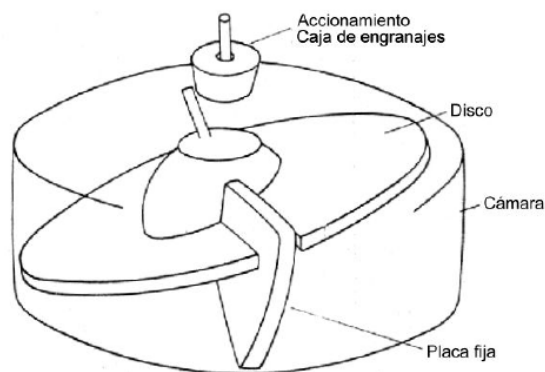


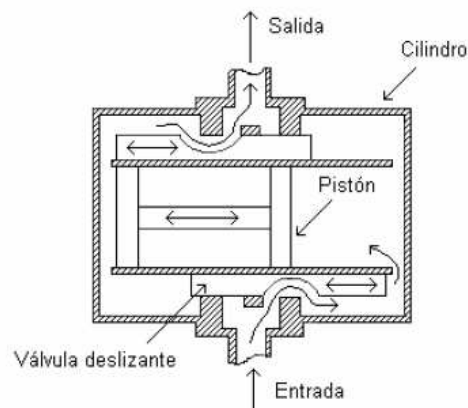
Figura 34: Medidor de disco giratorio.

Este instrumento se utiliza en aplicaciones domésticas para la medición de consumo de agua, se utiliza industrialmente en la medición de caudales de agua fría, agua caliente, aceite y líquidos alimenticios. La precisión es de  $\pm 1\%$  a  $\pm 2\%$ .

## B) Medidor de pistón alternativo

El medidor de pistón convencional es el más antiguo de los medidores de desplazamiento positivo. Básicamente, está compuesto por un cilindro en donde se aloja el pistón y las válvulas que permiten la entrada y salida del líquido en su interior, como se puede observar en la Figura 35. El instrumento se fabrica en muchas formas: de varios pistones, pistones de doble acción, que son los que el líquido se encuentra en ambas caras del pistón, válvulas rotativas, válvulas deslizantes horizontales....

Algunos caudalímetros, en lugar de tener válvulas, poseen lumbreras por donde entra y sale el líquido del cilindro, en este caso, es el pistón quien se encarga de abrirlas o cerrarlas con su cara lateral.



**Figura 35: Medidor de pistón alternativo.**

Los pistones se unen mecánicamente a un cigüeñal por medio de una biela, para transformar el movimiento alternativo de los pistones en movimiento circular. En el cigüeñal van ubicados uno o varios pequeños imanes que giran con él. Muy cerca de los imanes se coloca un transductor magnético, similar a los que poseen los medidores de turbina. Cuando un imán pasa frente al transductor, éste envía un pulso eléctrico como

señal de salida. El cálculo del caudal se realiza mediante el conteo de los pulsos del transductor en un intervalo de tiempo determinado.

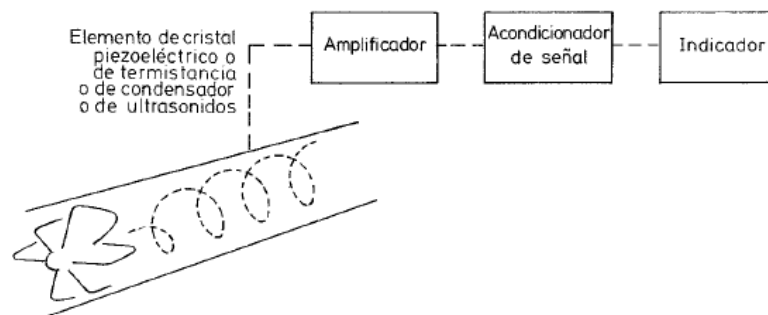
La precisión de este instrumento es muy elevada, del orden de  $\pm 0,2\%$ . En contraposición su capacidad es pequeña comparada con los tamaños de otros medidores; su coste inicial es alto y son difíciles de reparar.

### 5.2.1.7 Medidor de torbellinos

El medidor de caudal por torbellinos se basa en la determinación de la frecuencia del torbellino, ya sea producido por una hélice estática, medidor de torbellino, o por un cuerpo en forma de cono, Vortex.

#### A) Torbellino

El principio de operación del instrumento está basado en el fenómeno natural de la emisión de torbellinos. Cuando el fluido circula pasa por una hélice estática situada dentro de la tubería por donde pasa el fluido, como se puede observar en la Figura 36, produciendo torbellinos.



**Figura 36: Medidor por torbellino.**

La frecuencia de emisión de estos torbellinos es proporcional a la velocidad con la que el fluido pasa por el objeto, de acuerdo con la expresión de Strouhal (ec. 67):

$$St = \frac{fd}{v} \quad (\text{ec. 67})$$



$$v = \frac{fd}{St} \quad (\text{ec. 68})$$

Donde:

$f$ : Frecuencia del torbellino.

$d$ : Ancho del torbellino, lo proporciona el fabricante y es proporcional al ancho del obstáculo que produce el torbellino.

La ecuación del caudal se obtiene, sustituyendo la (ec. 68) en la (ec. 6):

$$Q = S \frac{fd}{St} \quad (\text{ec. 69})$$

Donde:

$S$ : Sección de la tubería.

Varias técnicas de detección de torbellinos son usadas en los instrumentos, como térmicas, magnéticas, ultrasónicas o capacitivas. Tales instrumentos no tienen partes móviles, operan en un gran rango de flujos y requieren mínimo mantenimiento. Pueden medir tanto líquidos como gases y poseen una exactitud de  $\pm 0,2\%$  de la escala medida, aunque puede ser seriamente afectada si existen turbulencias por delante del punto donde se mide.

## **B) Medidor Vortex**

Los medidores Vortex son parecidos a los medidores de torbellino. La diferencia de los medidores Vortex es que están basados en el principio de Von Karman; en el cual cuando un fluido fluye por un cuerpo en forma de cono se generan alternativamente vórtices, áreas de baja presión y estabilidad, por los lados de este cuerpo, como se puede apreciar en la Figura 37. La frecuencia de estos vórtices es directamente proporcional a la velocidad, y por tanto, al caudal.

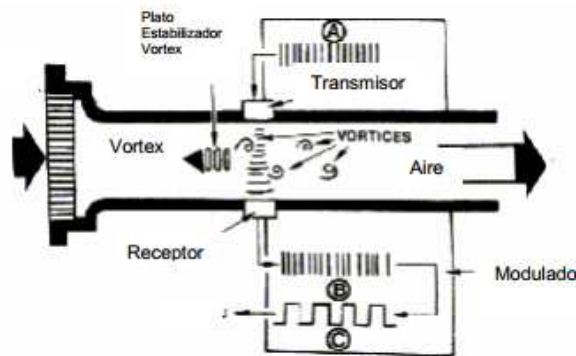


Figura 37: Medidor Vortex.

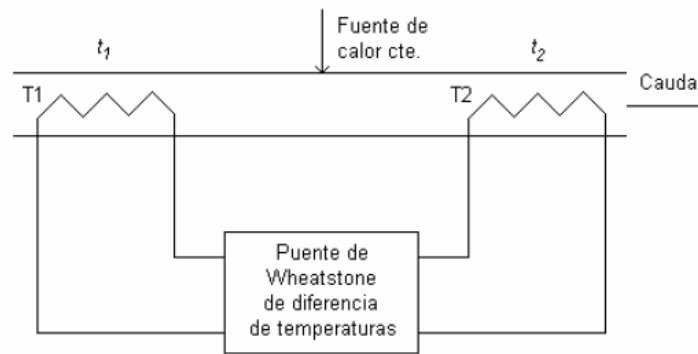
Poseen una exactitud de  $\pm 1\%$  de la escala medida.

## 5.2.2 Medidores de caudal máscicos

Si bien en la industria normalmente se emplean medidores volumétricos para medir el caudal, a menudo interesa aprovechar las características medibles de la masa.

### 5.2.2.1 Medidores térmicos de caudal

El funcionamiento del medidor térmico de caudal se basa en el principio físico de la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente. Este aparato, que también recibe el nombre de medidor Thomas, consta de una fuente de alimentación eléctrica que proporciona calor constante al punto medio de un tubo por el cual circula un fluido. En los puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura del fluido, como se puede observar en la Figura 38. Las sondas de resistencia forman parte de un puente de Wheatstone y la tensión de salida resulta proporcional a la diferencia de temperaturas de las sondas.



**Figura 38: Medidor térmico de caudal.**

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es la misma en las dos sondas. Cuando el fluido circula por el tubo, transporta una cantidad de calor hacia la segunda resistencia  $T_2$ , y se produce una diferencia de temperaturas entre los dos elementos que va aumentando a medida que aumenta el caudal.

La diferencia de temperaturas es proporcional a la masa del fluido que circula por el tubo:

$$Q_c = \dot{m} c_e (T_2 - T_1) \quad (\text{ec. 70})$$

Donde:

$Q_c$ : Calor cedido por la fuente por unidad de tiempo ( $\frac{J}{s}$ ).

$\dot{m}$ : Caudal másico ( $\frac{g}{s}$ ).

$c_e$ : Calor específico del fluido ( $\frac{J}{g \cdot ^\circ C}$ ).

$T_2$ : Temperatura de la sonda T2 ( $^\circ C$ ).

$T_1$ : Temperatura de la sonda T1 ( $^\circ C$ ).

Por lo que la masa que circula por el tubo es:

$$\dot{m} = \frac{Q_c}{c_e (T_2 - T_1)} \quad (\text{ec. 71})$$

La precisión que se logra con este tipo de instrumento es del orden de  $\pm 1\%$ . Se utiliza normalmente para bajos caudales de aproximadamente  $0 - 10 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ .

### 5.2.2.2 Medidores de Coriolis

Un medidor de flujo de masa de Coriolis es un dispositivo que mide la cantidad de líquido que fluye a través de un tubo en forma de *U* llamado lazo, el cual es forzado a vibrar a su frecuencia natural con lo cual se produce un momento sobre el tubo debido a la fuerza de Coriolis.

El principio de operación del medidor de Coriolis consiste en la vibración del lazo a su frecuencia natural por medio de una bobina electromagnética, que lo mueve hacia arriba y hacia abajo creando una velocidad angular alrededor del eje de la base, como se puede apreciar en la Figura 39.

A medida que el fluido se mueve a través del lazo es forzado a formar un momento vertical, el cual se incrementa a medida que el fluido entra en el lazo y decrece a medida que sale del mismo.

Durante el medio ciclo de vibraciones cuando el lazo se mueve hacia arriba, el fluido que entra al lazo opone resistencia empujando el tubo hacia abajo. Recíprocamente, el fluido que sale del lazo se resiste disminuyendo su momento vertical y empujando hacia arriba contra el tubo.

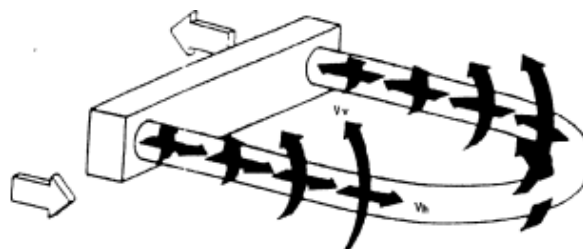


Figura 39: Medidor de Coriolis.

Esta combinación de fuerzas resistivas hace que se produzca un momento en el lazo, a esto se le conoce como efecto Coriolis.

La magnitud del momento del tubo sensor es directamente proporcional al flujo másico a través de éste.

En cada lado del lazo se colocan sensores electromagnéticos para medir la velocidad del tubo en esos dos puntos. Cualquier diferencia entre esas dos señales de velocidad es causada por el torcimiento del lazo. Los sensores envían esta información a la unidad electrónica donde es procesada y convertida en una señal de flujo másico.

Cuando el fluido fluye en el lazo es forzado a tomar la velocidad vertical creciente en el momento que entra al lazo y decreciente cuando sale del mismo, por lo cual aparece la aceleración de Coriolis. La aceleración de Coriolis está dada por:

$$a_c = 2vw \quad (\text{ec. 72})$$

Donde:

$a_c$ : Aceleración de Coriolis  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$w$ : Velocidad angular alrededor del eje del tubo  $\left(\frac{rad}{s}\right)$ .

$v$ : Velocidad lineal del fluido  $\left(\frac{m}{s}\right)$ .

Por la segunda ley de Newton queda:

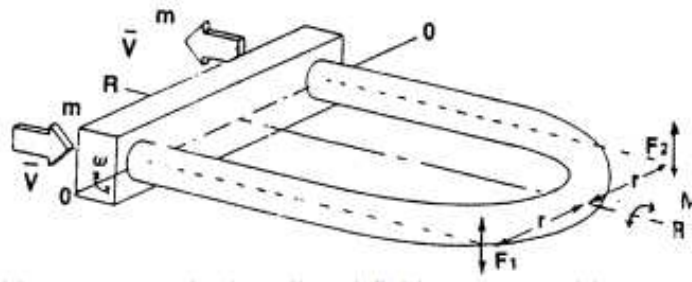
$$F_c = ma_c = 2mvw \quad (\text{ec. 73})$$

Donde:

$F_c$ : Fuerza de Coriolis  $(N)$ .

$m$ : Masa del fluido contenida en el tubo recto  $(Kg)$ .

Para determinar el flujo másico se requiere determinar el momento creado en el lazo por la fuerza de Coriolis actuando sobre el mismo, que son  $F_1$  y  $F_2$  actuando en direcciones opuestas sobre el lazo, como se puede observar en la Figura 40.



**Figura 40: Medidor de Coriolis.**

El lazo vibra alrededor del eje  $O - O$  (Figura 41), debido a la acción de la bobina electromagnética y las fuerzas de Coriolis crean un momento oscilatorio alrededor del eje  $R - R$ . Este momento viene dado por:

$$M = F_1 r_1 + F_2 r_2 \quad (\text{ec. 74})$$

Donde:

$M$ : Momento oscilatorio alrededor del eje  $R - R$  ( $Nm$ ).

$F_1 = F_2 = F_c$ : Fuerzas de Coriolis ( $N$ ).

$r_1 = r_2 = r$ : Distancia del eje  $R - R$  a los puntos donde se crean las fuerzas de Coriolis ( $m$ ).

$$M = 2F_c r \quad (\text{ec. 75})$$

Sustituyendo la (ec. 73) en la (ec. 75):

$$M = 4mvr \quad (\text{ec. 76})$$

La velocidad se define como:

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (\text{ec. 77})$$

Donde:

$L$ : Longitud del lazo ( $m$ ).

$\Delta t$ : Tiempo en que tarda el lazo en pasar dos veces consecutivas por el punto neutro ( $s$ ).

El flujo másico  $\dot{m}$  se define como la masa que pasa por un punto dado por unidad de tiempo.

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \quad (\text{ec. 78})$$

$$\Delta t = \frac{m}{\dot{m}} \quad (\text{ec. 79})$$

Sustituyendo la (ec. 79) en la (ec. 77):

$$v = \frac{\dot{m}L}{m} \quad (\text{ec. 80})$$

Sustituyendo la (ec. 80) en la (ec. 76):

$$M = 4wr\dot{m}L \quad (\text{ec. 81})$$

En general, para cualquier resorte de torsión se cumple:

$$T = K_s\theta \quad (\text{ec. 82})$$

Donde:

$T = M$ : Torsión del tubo que equivale al par creado respecto al eje  $R - R$ . (Nm).

$K_s$ : Constante de elasticidad del tubo.

$\theta$  : Desplazamiento angular de torsión del tubo.

Igualando la (ec. 81) y la (ec. 82), el caudal másico es:

$$K_s\theta = 4wr\dot{m}L \quad (\text{ec. 83})$$

$$\dot{m} = \frac{K_s\theta}{4wr} \quad (\text{ec. 84})$$

El medidor de Coriolis mide el flujo másico directamente por lo que su salida no depende de las variaciones de parámetros críticos tales como: presión, temperatura,

viscosidad, velocidad o densidad. Además no posee sensores intrusivos con partes móviles en la dirección del flujo ni requiere tubería especial para su instalación; la instalación en línea puede tener cualquier orientación y sin requerimientos de tramos rectos de tubería.

Poseen una exactitud de  $\pm 0,2\%$  a escala completa. Algunos fabricantes dan exactitudes de  $\pm 0,1\%$  con una repetibilidad de  $\pm 0,05\%$ , lo que deriva en un incremento considerable de su precio.

En cambio su utilización es limitada debido al tamaño de los sensores, para aplicaciones de medición de flujo en tuberías de diámetros superiores a 15 cm. no es posible su utilización.

Por último una de sus desventajas es un tiempo de vida, que resulta limitado debido a las constantes vibraciones pueden originar fallas en la soldadura del lazo.

### 5.3 Selección de los medidores de caudal

Es muy importante elegir un medidor de flujo que se ajuste lo mejor que se pueda a una aplicación en específico, pero hay que tener ciertos criterios para elegir el medidor de flujo que se ajuste perfectamente a la aplicación para la cual se ha de adquirir.

Para elegir un sistema de medición de caudal y por consiguiente un medidor, se debe tener en cuenta:

- Si el agua va por canal abierto o por tubería.
- Diámetro de la tubería.
- Caudal en el momento del diseño y en el año horizonte.
- Velocidad del agua.
- Si el agua es limpia o va cargada de materias en suspensión.
- Exactitud o incertidumbre requeridas.

En las tablas 6 y 7 se muestran las características de forma general de los medidores de flujo.



	Líquido limpio	Líquido sucio	Líquido viscoso	Fluido corrosivo	Gases limpios	Gases sucios	Vapor
Placa orificio	☺	✗	✗	✗	☺	✗	☺
Tobera	☺	☐	✗	☐	☺	☐	☐
Venturi	☺	☐	✗	☐	☺	☐	☐
Pitot	☺	✗	☐	☐	☺	✗	✗
Rotámetro	☺	☐	☐	☐	☺	✗	☐
Turbina	☺	✗	☐	☐	☺	✗	☺
Tiempo de tránsito	☺	✗	☐	☺	✗	✗	✗
Doppler	☐	☺	☐	☺	✗	✗	✗
Desplazamiento positivo	☺	☐	☺	☐	☺	✗	✗
Magnético	☺	☺	☺	☺	✗	✗	✗
Coriolis	☺	☺	☺	☐	☐	☐	☐
Térmico	☐	✗	✗	☐	☺	☐	✗

- ☺ Recomendado  
☐ Aplicación limitada  
✗ No recomendado

**Tabla 6: Características de los medidores de flujo en función del fluido utilizado.**

	Tamaños disponibles	Exactitud óptima	Limitaciones por Reynolds	Pérdida de presión	Coste relativo	Diámetro aguas arriba	Instalación	Mantenimiento
Placa orificio	> 1''	1-2 %	> 30000	H	L	10-30D	M-H	M-H
Tobera	> 2''	0,95-1,5 %	> 75000	H	M	10-30D	M	L
Venturi	> 2''	0,75%	> 75000	L	H	5-10D	M	L
Pitot	≥ 3''	1,5 - 4 %	> 100000	L	L	20-30D	M	L
Rotámetro	≤ 3''	1%	N	M	L	N	L	L
Turbina	> 0,25''	0,3 %	≤ 2cSt	H	M	10-20D	L	M-H
Tiempo de tránsito	> 0,5 %	2%	N	L	M	5-20D	L	L
Doppler	> 0,5''	2%	N	L	M	5-20D	L	L
Desplazamiento positivo	< 12''	0,2 - 2 %	≤ 8000cSt	H	H	N	H	H
Magnético	> 1''	0,1 %	N	L	H	5D	H	M
Coriolis	< 6''	0,1- 0,2 %	N	M	H	N	H	L-M
Térmico	> 2''	1%	> 0,001 pies/s	M	M	10 m	M	M

N: Ninguno    L: Bajo    M: Medio    H: Alto

**Tabla 7: Características de los medidores de flujo en función de la aplicación.**

Las características anteriores influyen de forma decisiva sobre la elección de los medidores de flujo, esta elección debe cubrir las necesidades de la aplicación y del proceso en el cual va a trabajar dicho medidor.

A la hora de elegir entre medidores de flujo volumétricos y másicos, hay que señalar que éstos últimos han penetrado con gran rapidez en los campos de aplicación, ya que sus diseños sin ningún tipo de pieza móvil dentro del fluido, evitan la problemática que pueden sufrir los medidores volumétricos, aunque estos sigan ofreciendo una mayor exactitud en las medidas.

Por último, también es necesario analizar la zona física de la situación de la línea de tratamiento de la EDAR, como por ejemplo en vertederos, ya que su utilización en las medidas de caudal en plantas depuradoras se lleva a efecto en muy pocos casos, debido a la pérdida de carga que tiene lugar por la diferencia de niveles necesaria entre antes y después del vertedero; ya que estas plantas suelen construirse en terrenos relativamente llanos en los que no se dispone de suficiente diferencia de cota entre la entrada y salida de la planta para permitirse el lujo de tener importantes pérdidas de carga en cada uno de los procesos de depuración.

## **5.4 Localización de los medidores de caudal en una EDAR**

Las medidas de caudal en una depuradora suelen ser:

- Caudal de entrada a la planta.
- Caudal de salida de la planta.
- Caudal de fangos.
- Caudal de aire.
- Caudal de reactivos: esta es la medida en la que normalmente no se utilizan instrumentos de control ya que para la adición de reactivos se utilizan distintos sistemas de dosificación, que tienen la precisión suficiente para asegurar la adición correcta de los mismos.

Dependiendo del caudal de diseño de la EDAR, serán necesarias más unidades de medición de caudal, como se puede observar en la Tabla 8, y ver si situación en la Figura 41.

Lugar de medición	EDAR's Qd < 1000m <sup>3</sup> /día	EDAR's Qd > 1000m <sup>3</sup> /día
Caudal a la entrada de la planta (1)	SÍ	SÍ
Caudal a la salida de la planta (2)	NO	SÍ
Caudal a la entrada del tratamiento primario (3)	NO	SÍ
Caudal del by-pass (en caso de existir)	NO	SÍ
Caudal de fango primario (4)	NO	SÍ
Caudal del tratamiento biológico (5)	NO	SÍ
Caudal de fango a digestión (6)	NO	SÍ
Caudal de fango secundario (7)	NO	SÍ
Caudal de fangos a deshidratación (8)	NO	SÍ

Tabla 8: Lugar de colocación de los caudalímetros en una EDAR.

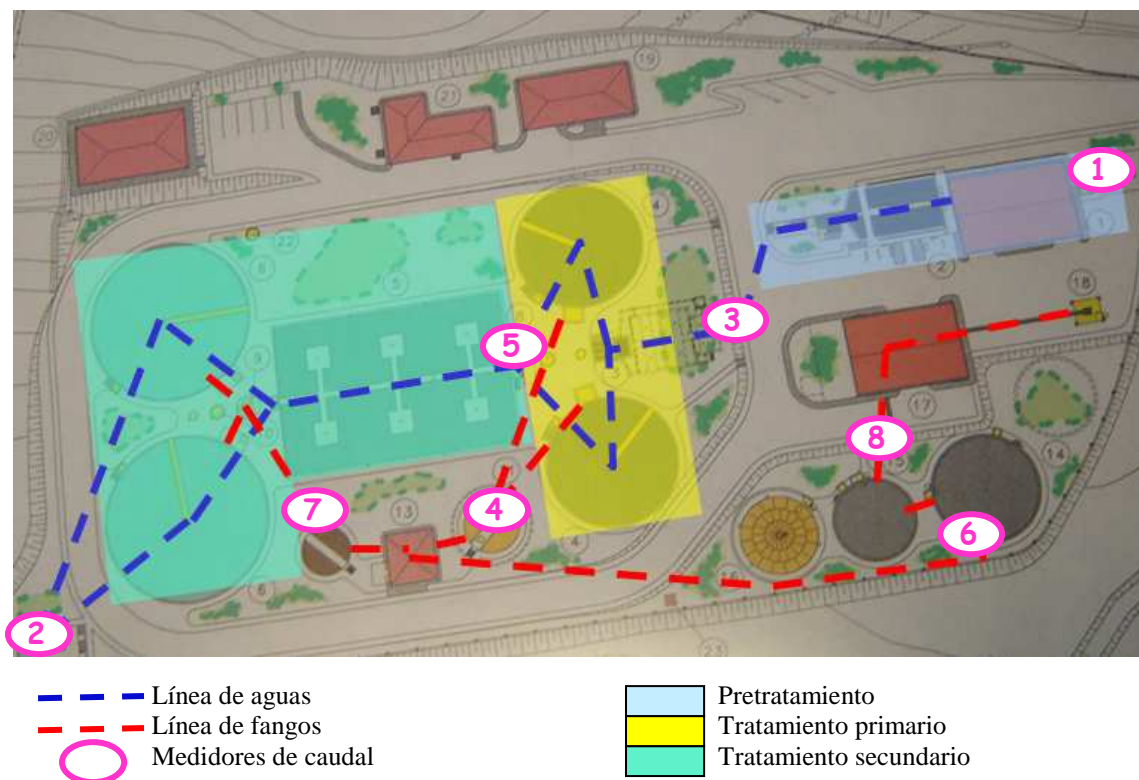


Figura 41: Planta de tratamientos de aguas residuales

La ubicación de los medidores de caudal tras el pretratamiento pretende minimizar los problemas asociados a obturaciones, desgastes, formación de depósitos de grasas...

El caudal de diseño del pretratamiento, referido al caudal instantáneo horario debe ser superior en 2,5 veces al caudal medio horario de diseño del resto de la línea de agua, con el fin de asegurar el completo pretratamiento en caso de lluvias, infiltraciones o cualquier otra incidencia. Todo este caudal debe ser medido en cabecera de tratamiento.

## **Capítulo 6**

# **Conclusiones**

## 6.1 Conclusiones

De acuerdo a lo expuesto a lo largo del proyecto, se puede concluir:

1. Se utilizarán medidores de caudal que permitan la medición de fluidos con alto contenido de sólidos en suspensión, ya que las aguas residuales tratadas a lo largo de toda la línea van a poseer mayor o menor grado de sólidos en suspensión.
2. Las aguas a tratar en la planta son aguas muy agresivas, capaces de romper, obstruir,... por lo tanto se utilizarán medidores robustos.
3. Se utilizarán medidores de caudal en la línea de fangos que permitan fluidos viscosos.
4. La mayor parte del agua circulante en las EDAR se realiza en canal abierto, lo cual limita la elección del medidor en ciertas zonas; ya se esté realizando la recogida, la conducción, el tratamiento o la evacuación de las aguas residuales urbanas.

Se ha determinado una posible tipología de los medidores de caudal en una EDAR, siendo ésta, de acuerdo a la Tabla 8 y a la Figura 41:

1. Medidor de caudal a la entrada de la planta (1): Ultrasónico tipo Doppler, ya que es un medidor no invasivo, se puede instalar fuera de la tubería o canal, y por lo tanto permite la medición de fluidos con alto contenido en suspensión.
2. Medidor de caudal a la salida de la planta (2): Ultrasónico tipo Doppler.
3. Medidor de caudal a la entrada del tratamiento primario (3): Canal Parshall, ya que es una zona de canal abierto, deja pasar fácilmente sedimentos o desechos, muy abundantes en esa zona de la línea de aguas; y sólo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador, además no necesita condiciones especiales de acceso.
4. Medidor de caudal de fango primario (4): Medidor magnético, ya que permite el flujo sin ninguna obstrucción, es independiente por completo de la temperatura, la viscosidad, la gravedad específica y la turbulencia. Además es más robusto y pesado que otros medidores; y posee mayor precisión.
5. Medidor de caudal del tratamiento biológico (5): Medidor magnético.
6. Medidor de caudal de fango a digestión (6): Medidor magnético.
7. Medidor de caudal de fango secundario (7): Medidor magnético.

8. Medidor de caudal de fangos a deshidratación (8): Medidor magnético.



## **Bibliografía**



- [1].Mariano Seoáñez Calvo. Dr. Ingeniero de Montes.“Aguas Residuales: Tratamientos por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnología. Diseño.” (Colección: Ingeniería del Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa).
- [2].A. Garrido, J. Segovia, M. Sanchez, J.F. López, A. Gadea, R. Egea. “Manual de especificaciones técnicas para proyectos de construcción, ampliación o reformas de estaciones depuradores de aguas residuales.” (Diego Martín librero editor).
- [3].Robert L. Mott. “Mecánica de fluidos aplicada.” (Prentice Hall, 4ª Edición).
- [4].George Tchobanoglous. Catedrático de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de California. “Ingeniería de aguas residuales. Redes de alcantarillado y bombeo”. (McGraw-Hill, 2ª Edición).
- [5].Aurelio Hernández Muñoz, Aurelio Hernández Lehmann, Pedro Galán Martínez. “Manual de depuración Uralita. Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20000 habitantes”. (Uralita productos y servicios S.A.) (Editorial Paraninfo).
- [6]. Alfredo José Constaín, Efraín Bernal Alzate. “Metodología básica de instrumentación industrial y electrónica”. (Universidad de La Salle).
- [7]. Josep M. Bergadá Graño. “Mecánica de fluidos”. (Iniciativa digital politécnica 2006).
- [8].Antonio Creus Solé. “Instrumentación Industrial” (Ediciones técnicas Marcombo, 8ª Edición).
- [9]. Página web:  
  
[www.efunda.com/designstandards/sensors/flowmeters/flowmeter\\_intro.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/flowmeters/flowmeter_intro.cfm)
- [10]. Página web: [http://es.omega.com/prodinfo/caudalimetros\\_es.html](http://es.omega.com/prodinfo/caudalimetros_es.html)



## **Anexos**

---

## **Anexo A: Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas**

EL CONSEJO DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS,

Visto el Tratado constitutivo de la Comunidad Económica Europea y, en particular, su artículo 130 S,

Vista la propuesta de la Comisión (1),

Visto el dictamen del Parlamento Europeo (2),

Visto el dictamen del Comité Económico y Social (3),

Considerando que, en su Resolución de 28 de junio de 1988 (4) sobre la protección del Mar del Norte y de otras aguas de la Comunidad, el Consejo solicitó a la Comisión que presentara propuestas con las medidas necesarias a nivel comunitario para el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Considerando que la contaminación debida a un tratamiento insuficiente de las aguas residuales de un Estado miembro repercute a menudo en las de otros Estados miembros y que, por tanto, es necesaria una acción comunitaria, con arreglo al artículo 130 R.

Considerando que es necesario un tratamiento secundario de las aguas residuales urbanas para evitar que la evacuación de dichas aguas tratadas de manera insuficiente tenga repercusiones negativas en el medio ambiente.

Considerando que es necesario exigir un tratamiento más riguroso en las zonas sensibles mientras que un tratamiento primario puede ser adecuado en algunas zonas menos sensibles.

Considerando que los sistemas colectores de entrada de aguas residuales industriales así como la evacuación de aguas residuales y lodo procedentes de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas deberían ser objeto de normas generales, reglamentaciones y/o autorizaciones específicas.

Considerando que deben someterse a requisitos adecuados los vertidos de aguas residuales industriales biodegradables, procedentes de determinados sectores industriales, que no entran en las plantas de tratamiento de las aguas residuales urbanas antes del vertido a las aguas receptoras.

Considerando que debe fomentarse el reciclado de los lodos producidos por el tratamiento de las aguas residuales; que debe suprimirse progresivamente la evacuación de lodos a las de aguas superficiales.

Considerando que es necesario controlar las instalaciones de tratamiento, las aguas receptoras y la evacuación de lodos para garantizar la protección del medio ambiente de las repercusiones negativas de los vertidos de aguas residuales.

Considerando que es importante garantizar la información al público, mediante la publicación de informes periódicos, sobre la evacuación de aguas residuales urbanas y lodos.

Considerando que los Estados miembros deberán elaborar y presentar a la Comisión programas nacionales para la aplicación de la presente Directiva.

Considerando que debería crearse un comité que colabore con la Comisión en los temas relacionados con la aplicación de la presente Directiva y con su adaptación al progreso técnico,

HA ADOPTADO LA PRESENTE DIRECTIVA:

## **Artículo 1**

La presente Directiva tiene por objeto la recogida, el tratamiento y el vertido de las aguas residuales urbanas y el tratamiento y vertido de las aguas residuales procedentes de determinados sectores industriales.

El objetivo de la Directiva es proteger al medio ambiente de los efectos negativos de los vertidos de las mencionadas aguas residuales.

## **Artículo 2**

A efectos de la presente Directiva, se entenderá por:

- 1) « Aguas residuales urbanas »: las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de correntía pluvial.
- 2) « Aguas residuales domésticas »: las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios y generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.
- 3) « Aguas residuales industriales »: todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de correntía pluvial.
- 4) « Aglomeración urbana »: la zona cuya población y/o actividades económicas presenten concentración suficiente para la recogida y conducción de las aguas residuales urbanas a una instalación de tratamiento de dichas aguas o a un punto de vertido final.
- 5) « Sistema colector »: un sistema de conductos que recoja y conduzca las aguas residuales urbanas.
- 6) « 1 e-h (equivalente habitante) »: la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días (DBO 5) de 60 g de oxígeno por día.
- 7) « Tratamiento primario »: el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico y/o químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO 5 de las aguas residuales que entren se reduzca por lo menos en un 20 % antes del vertido y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca por lo menos en un 50 %.
- 8) « Tratamiento secundario »: el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya, por lo general, un tratamiento biológico con sedimentación secundaria, u otro proceso en el que se respeten los requisitos del cuadro 1 del Anexo I.
- 9) « Tratamiento adecuado »: el tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante cualquier proceso y/o sistema de eliminación en virtud del cual, después del vertido de dichas aguas, las aguas receptoras cumplan los objetivos de calidad pertinentes y las disposiciones pertinentes de la presente y de las restantes Directivas comunitarias.
- 10) « Lodos »: los lodos residuales, tratados o no, procedentes de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas.

11) « Eutrofización »: el aumento de nutrientes en el agua, especialmente de los compuestos de nitrógeno y/o fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores, con el resultado de trastornos no deseados en el equilibrio entre organismos presentes en el agua y en la calidad del agua a la que afecta.

12) « Estuario »: la zona de transición, en la desembocadura de un río, entre las aguas dulces y las aguas costeras. Cada Estado miembro determinará los límites exteriores (orientados hacia el mar) de los estuarios a efectos de la presente Directiva, dentro del programa para su aplicación a que se refieren los apartados 1 y 2 del artículo 17.

13) « Aguas costeras »: las aguas situadas fuera de la línea de bajamar o del límite exterior de un estuario.

### **Artículo 3**

1. Los Estados miembros velarán por que todas las aglomeraciones urbanas dispongan de sistemas colectores para las aguas residuales urbanas:

- i.) a más tardar, el 31 de diciembre del año 2000 en el caso de las aglomeraciones con más de 15000 equivalentes habitante (« e-h »), y
- ii.) a más tardar, el 31 de diciembre del año 2005 en el caso de las aglomeraciones que tengan entre 2 000 y 15 000 e-h.

Cuando se trate de aguas residuales urbanas vertidas en aguas receptoras que se consideren « zonas sensibles » con arreglo a la definición del artículo 5, los Estados miembros velarán por que se instalen sistemas colectores, a más tardar, el 31 de diciembre de 1998 en las aglomeraciones con más de 10 000 e-h.

Cuando no se justifique la instalación de un sistema colector, bien por no suponer ventaja alguna para el medio ambiente o bien porque su instalación implique un coste excesivo, se utilizarán sistemas individuales u otros sistemas adecuados que consigan un nivel igual de protección medioambiental.

2. Los sistemas colectores mencionados en el apartado 1 cumplirán los requisitos establecidos en la letra A del Anexo I. Dichos requisitos podrán modificarse según el procedimiento establecido en el artículo 18.

---

## Artículo 4

1. Los Estados miembros velarán por que las aguas residuales urbanas que entren en los sistemas colectores sean objeto, antes de verterse, de un tratamiento secundario o de un proceso equivalente, en las siguientes circunstancias:

- a más tardar el 31 de diciembre del año 2000 para todos los vertidos que procedan de aglomeraciones que representen más de 15 000 e-h;
- a más tardar el 31 de diciembre del año 2005 para todos los vertidos que procedan de aglomeraciones que representen entre 10 000 y 15 000 e-h; • a más tardar el 31 de diciembre del año 2005 para los vertidos en aguas dulces o estuarios que procedan de aglomeraciones que representen entre 2 000 y 10 000 e-h.

2. Los vertidos de aguas residuales urbanas en aguas situadas en regiones de alta montaña (más 1500 m sobre el nivel del mar) en las que resulte difícil la aplicación de un tratamiento biológico eficaz debido a las bajas temperaturas, podrán someterse a un tratamiento menos riguroso que el que determina el apartado 1 siempre y cuando existan estudios detallados que indiquen que tales vertidos no perjudican al medio ambiente.

3. Los vertidos procedentes de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas mencionados en los apartados 1 y 2 cumplirán los requisitos pertinentes de la letra B del Anexo I. Dichos requisitos podrán modificarse según el procedimiento establecido en el artículo 18.

4. La carga expresada en e-h se calculará a partir del máximo registrado de la carga semanal media que entre en una instalación de tratamiento durante el año, sin tener en cuenta situaciones excepcionales como, por ejemplo, las producidas por una lluvia intensa.

## Artículo 5

1. A efectos del apartado 2, los Estados miembros determinarán, a más tardar el 31 de diciembre de 1993, las zonas sensibles según los criterios establecidos en el Anexo II.

2. A más tardar el 31 de diciembre de 1998, los Estados miembros velarán por que las aguas residuales urbanas que entren en los sistemas colectores sean objeto, antes de ser

vertidas en zonas sensibles, de un tratamiento más riguroso que el descrito en el artículo 4, cuando se trate de vertidos procedentes de aglomeraciones urbanas que representen más de 10 000 e-h.

3. Los vertidos de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas que se mencionan en el apartado 2 cumplirán los requisitos pertinentes de la letra B del Anexo I. Dichos requisitos podrán fijarse o modificarse según el procedimiento establecido en el artículo 18. 4. No obstante, los requisitos para instalaciones individuales indicados en los anteriores apartados 2 y 2 no deberán necesariamente aplicarse en zonas sensibles cuando se pueda demostrar que el porcentaje mínimo de reducción de la carga referido a todas las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas de dicha zona alcanza al menos el 75 % del total del fósforo y al menos el 75 % del total del nitrógeno.

5. Los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas que estén situadas en las zonas de captación de zonas sensibles y que contribuyan a la contaminación de dichas zonas quedarán sujetos a lo dispuesto en los apartados 2, 3 y 4. Las disposiciones del artículo 9 se aplicarán en los casos en que las zonas de captación contempladas en el párrafo primero estén situadas total o parcialmente en otro Estado miembro.

6. Los Estados miembros velarán por que la designación de las zonas sensibles se revise al menos cada cuatro años.

7. Los Estados miembros velarán por que las zonas identificadas como sensibles como resultado de la revisión a que se refiere el apartado 6 cumplan los requisitos anteriormente citados en un plazo de siete años.

8. A efectos de la presente Directiva, un Estado miembro no deberá designar zonas sensibles cuando aplique en la totalidad de su territorio el tratamiento establecido en los apartados 2, 3 y 4.

## **Artículo 6**

1. A efectos del apartado 2, los Estados miembros podrán determinar, a más tardar el 31 de diciembre de 1993, zonas menos sensibles según los criterios expuestos en el Anexo II.



2. Los vertidos de aguas residuales urbanas procedentes de aglomeraciones urbanas que representen entre 10 000 y 150 000 e-h en aguas costeras y de las aglomeraciones de entre 2 000 y 10 000 e-h en estuarios situados en las zonas a que se refiere el apartado 1 podrán ser objeto de un tratamiento menos riguroso que el establecido en el artículo 4 cuando:

- dichos vertidos reciban, al menos, un tratamiento primario con arreglo a la definición del apartado.7 del artículo 2 y de conformidad con los procedimientos de control que se establecen en la letra D del Anexo I;
- existan estudios globales que indiquen que dichos vertidos no tendrán efectos negativos sobre el medio ambiente. Los Estados miembros facilitarán a la Comisión cualquier información importante relativa a los citados estudios.

3. Si la Comisión considerase que no se cumplen las condiciones establecidas en el apartado 2, presentará al Consejo una propuesta adecuada.

4. Los Estados miembros velarán por que la lista de zonas menos sensibles se revise al menos cada 4 años.

5. Los Estados miembros velarán por que las zonas que hayan dejado de ser consideradas zonas menos sensibles cumplan los requisitos de los artículos 4 y 5, según proceda, en un plazo de siete años.

## **Artículo 7**

Los Estados miembros velarán por que, el 31 de diciembre del año 2005 a más tardar, las aguas residuales urbanas que entren en los sistemas colectores sean objeto de un tratamiento adecuado tal como se define en el punto 9) del artículo 2, antes de ser vertidas, en los siguientes casos:

- cuando procedan de aglomeraciones urbanas que representen menos de 2 000 e-h y se viertan en aguas dulces y estuarios;
- cuando procedan de aglomeraciones urbanas que representen menos de 10 000 e-h y se viertan en aguas costeras.

---

## Artículo 8

1. En casos excepcionales debidos a problemas técnicos y para grupos de población geográficamente definidos, los Estados miembros podrán presentar a la Comisión una solicitud especial de ampliación del plazo para dar cumplimiento a lo dispuesto en el artículo 4.

2. En esta solicitud, que deberá ser debidamente justificada, se expondrán las dificultades técnicas experimentadas y se propondrá un programa de acción con un calendario apropiado que deberá llevarse a cabo para alcanzar el objetivo de la presente Directiva. Dicho calendario se incluirá en el programa para la aplicación contemplado en el artículo 17.

3. Sólo se aceptarán razones técnicas y el aplazamiento no podrá exceder del 31 de diciembre del año

2005.

4. La Comisión examinará esta solicitud y tomará las medidas apropiadas con arreglo al procedimiento establecido en el artículo 18.

5. En circunstancias excepcionales en las que se demuestre que un tratamiento más avanzado no redundará en ventajas para el medio ambiente, podrán someterse los vertidos en zonas menos sensibles de aguas residuales procedentes de aglomeraciones urbanas con más de 150 000 e-h al tratamiento contemplado en el artículo 6 para las aguas residuales procedentes de aglomeraciones urbanas que representen entre 10 000 y 150 000 e-h.

En tales circunstancias, los Estados miembros presentarán previamente a la Comisión un expediente. La Comisión estudiará la situación y tomará las medidas pertinentes de acuerdo con el procedimiento previsto en el artículo 18.

## Artículo 9

Cuando los vertidos de aguas residuales urbanas de un Estado miembro tengan efectos negativos para aguas comprendidas en la zona de jurisdicción de otro Estado miembro, el Estado miembro cuyas aguas resulten afectadas podrá notificar los hechos correspondientes al otro Estado miembro y a la Comisión.

Los Estados miembros implicados organizarán la concertación necesaria para identificar los vertidos de que se trate, con intervención de la Comisión cuando proceda, y dispondrán las medidas necesarias en origen para proteger las aguas afectadas, a fin de velar por el cumplimiento de las disposiciones de la presente Directiva.

## **Artículo 10**

Los Estados miembros velarán por que las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas construidas a fin de cumplir los requisitos de los artículos 4, 5, 6 y 7 sean diseñadas, construidas, utilizadas y mantenidas de manera que en todas las condiciones climáticas normales de la zona tengan un rendimiento suficiente. En el diseño de las instalaciones se tendrán en cuenta las variaciones de la carga propias de cada estación.

## **Artículo 11**

1. Los Estados miembros velarán por que, a más tardar el 31 de diciembre de 1993, el vertido de aguas residuales industriales en sistemas colectores e instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas se someta a la normativa previa y/o a autorizaciones específicas por parte de la autoridad competente o de los organismos adecuados.
2. Las normativas y/o autorizaciones específicas cumplirán los requisitos expuestos en la letra C del Anexo I. Dichos requisitos podrán modificarse según el procedimiento establecido en el artículo 18.
3. Las normativas y autorizaciones específicas se revisarán y, en su caso, adaptarán a intervalos regulares.

## **Artículo 12**

1. Las aguas residuales tratadas se reutilizarán cuando proceda. Las vías de evacuación reducirán al mínimo los efectos adversos sobre el medio ambiente.
2. Las autoridades competentes o los organismos adecuados velarán por que los vertidos de aguas residuales procedentes de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas estén sujetos a normativas preexistentes y/o a autorizaciones específicas.

3. Las normativas preexistentes y/o las autorizaciones específicas relativas a vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas, concedidas en aplicación del apartado 2 en aglomeraciones urbanas de 2000 a 10000 e-h cuando se trate de vertidos en aguas dulces y estuarios, y en aglomeraciones urbanas de 10000 e-h o más para todo tipo de vertidos, incluirán las condiciones necesarias para cumplir los requisitos correspondientes de la letra B del Anexo I. Dichos requisitos podrán modificarse según el procedimiento establecido en el artículo 18.

4. Las normativas y/o autorizaciones se revisarán, y en caso necesario se adaptarán, a intervalos regulares.

### **Artículo 13**

1. Los Estados miembros velarán por que, a más tardar el 31 de diciembre del año 2000, las aguas residuales industriales biodegradables procedentes de instalaciones que procedan de los sectores industriales enumerados en el Anexo III y que no penetren en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas antes de ser vertidas en las aguas receptoras se sometan antes del vertido a las condiciones establecidas en la normativa previa y/o a autorización específica por parte de la autoridad competente o del organismo que corresponda, para todos los vertidos procedentes de instalaciones que presenten 4000 e-h o más.

2. El 31 de diciembre de 1993 a más tardar, las autoridades competentes o los organismos correspondientes de cada Estado miembro establecerán los requisitos para el vertido de dichas aguas residuales adecuados a la índole de la industria de que se trate.

3. La Comisión efectuará un estudio comparativo de los requisitos de los Estados miembros a más tardar el 31 de diciembre de 1994. Publicará en un informe el resultado de ese estudio y en caso necesario presentará una propuesta adecuada.

### **Artículo 14**

1. Los lodos que se originen en el tratamiento de las aguas residuales se reutilizarán cuando proceda. Las vías de evacuación reducirán al mínimo los efectos adversos sobre el medio ambiente.

2. Las autoridades competentes u organismos correspondientes velarán por que a más tardar el 31 de diciembre de 1998 la evacuación de lodos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas esté sometida a normas generales, a registro o a autorización.
3. Los Estados miembros velarán por que, a más tardar el 31 de diciembre de 1998, se suprima progresivamente la evacuación de lodos a aguas de superficie, ya sea mediante vertido desde barcos, conducción por tuberías o cualquier otro medio.
4. Hasta la supresión de las formas de evacuación que se mencionan en el apartado 3, los Estados miembros velarán por que medie autorización para la evacuación de la cantidad total de materiales tóxicos, persistentes o bioacumulables presentes en los lodos evacuados a aguas de superficie y por que dicha cantidad se reduzca progresivamente.

## **Artículo 15**

1. Las autoridades competentes u organismos correspondientes controlarán:
  - los vertidos de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas para verificar el cumplimiento de los requisitos de la letra B del Anexo I con arreglo a los procedimientos de control establecidos en la letra D del Anexo I;
  - las cantidades y composición de los lodos vertidos en aguas de superficie.
2. Las autoridades competentes u organismos correspondientes controlarán las aguas sometidas a vertidos desde las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas y a vertidos directos, con arreglo a lo dispuesto en el artículo 13, en los casos en los que pueda preverse que produzcan efectos importantes sobre el medio ambiente.
3. Cuando se trate de un vertido según lo dispuesto en el artículo 6 y en el caso de una evacuación de lodos a aguas de superficie, los Estados miembros realizarán los controles y los estudios pertinentes para verificar que los vertidos o evacuaciones no tienen efectos negativos sobre el medio ambiente.
4. La información que recojan las autoridades competentes o los organismos correspondientes de conformidad con los apartados 1, 2 y 3 se conservará en los Estados

miembros y se facilitará a la Comisión dentro de los 6 meses posteriores a la recepción de una petición en este sentido.

5. Las directrices sobre control contemplado en los apartados 1, 2 y 3 podrán fijarse según el procedimiento establecido en el artículo 18. Artículo 16

Sin perjuicio de la aplicación de lo dispuesto en la Directiva 90/313/CEE del Consejo, de 7 de junio de 1990, sobre libertad de acceso a la información en materia de medio ambiente (5), los Estados miembros velarán por que las autoridades u organismos correspondientes publiquen cada dos años un informe de situación sobre el vertido de aguas residuales urbanas y de lodos en su zona. Los Estados miembros cursarán dichos informes a la Comisión tan pronto como se publiquen.

### **Artículo 17**

1. Los Estados miembros elaborarán, a más tardar el 31 de diciembre de 1993, un programa para la aplicación de la presente Directiva.

2. Los Estados miembros proporcionarán a la Comisión la información sobre el programa a más tardar el 30 de junio de 1994.

3. Si fuere necesario, los Estados miembros proporcionarán a la Comisión, a más tardar el 30 de junio cada dos años, una actualización de la información contemplada en el apartado 2.

4. Los métodos y modelos de presentación que deban adoptar los informes sobre los programas nacionales se establecerán de conformidad con el procedimiento establecido en el artículo 18. Toda modificación de dichos métodos y modelos se adoptará de conformidad con el mismo procedimiento.

5. La Comisión revisará y valorará cada dos años la información que reciba en virtud de lo dispuesto en los apartados 2 y 3 y publicará un informe al respecto.

### **Artículo 18**

1. La Comisión estará asistida por un Comité compuesto por representantes de los Estados miembros y presidido por el representante de la Comisión.

2. El representante de la Comisión presentará al comité un proyecto de medidas. El Comité emitirá su dictamen sobre dicho proyecto en un plazo que el presidente podrá determinar en función de la urgencia de la cuestión. El dictamen se emitirá según la mayoría prevista en el apartado 2 del artículo 148 del Tratado para adoptar aquellas decisiones que el Consejo deba tomar a propuesta de la Comisión. Los votos de los representantes de los Estados miembros en el Comité se ponderarán de la manera definida en el mencionado artículo. El presidente no tomará parte en la votación.

3. a) La Comisión adoptará las medidas previstas cuando sean conformes al dictamen del Comité.

b) Cuando las medidas previstas no sean conformes al dictamen del Comité o en caso de ausencia de dictamen, la Comisión someterá sin demora al Consejo una propuesta relativa a las medidas que deban tomarse. El Consejo se pronunciará por mayoría cualificada.

Si transcurrido un plazo de tres meses a partir del momento en que la propuesta se haya sometido al Consejo, éste no se hubiere pronunciado, la Comisión adoptará las medidas propuestas, excepto en el caso en que el Consejo se haya pronunciado por mayoría simple contra dichas medidas.

## **Artículo 19**

1. Los Estados miembros pondrán en vigor las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a la presente Directiva a más tardar el 30 de junio de 1993. Informarán de ello inmediatamente a la Comisión.

2. Cuando los Estados miembros adopten las disposiciones contempladas en el apartado 1, éstas harán referencia a la presente Directiva o irán acompañadas de una referencia a la misma en su publicación oficial. Los Estados miembros establecerán las modalidades de la mencionada referencia.

3. Los Estados miembros comunicarán a la Comisión el texto de las disposiciones esenciales de Derecho interno que adopten en el ámbito regulado por la presente Directiva.

## **Artículo 20**

Los destinatarios de la presente Directiva serán los Estados miembros



---

**Anexo B: Proyecto de Real Decreto por el que se establecen las condiciones básicas para llevar a cabo la reutilización de las aguas depuradas y se modifica parcialmente el reglamento del dominio público hidráulico aprobado por el real decreto 849/1986, de 11 de abril.**

La Ley 11/2005 de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, contiene una modificación del Texto Refundido de la Ley de Aguas aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, en la que se ha dado nueva redacción al artículo 109, “el Gobierno establecerá las condiciones básicas para la reutilización de las aguas, precisando la calidad exigible a las aguas depuradas según los usos previstos. El titular de la concesión o autorización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización de las aguas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento”.

Se mantiene, sin modificación, el apartado 2 del artículo 109, en el que se recoge la obligación de obtener concesión administrativa que quedará sustituida por una autorización cuando quien solicite el aprovechamiento de las aguas depuradas sea el titular de la autorización de vertido que dio lugar a la depuración de dichas aguas.

Se completa la modificación del artículo 109 con la supresión de los apartados 3,4 y 5 del precepto.

Este profundo cambio legislativo exige adaptar los artículos del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, dedicados a la reutilización.

Se hace preciso establecer una regulación reglamentaria más completa y detallada que posibilite las soluciones necesarias respecto de la reutilización. De este modo, se define el concepto de reutilización y se introduce la denominación de aguas regeneradas, más acorde con las posibilidades de reutilización que la norma establece y ampliamente admitida en la doctrina técnica y jurídica. Se determinan los requisitos

necesarios para llevar a cabo la actividad de utilización de aguas regeneradas, los procedimientos para obtener la concesión exigida en la Ley así como disposiciones relativas a los usos admitidos y exigencias de calidad precisas en cada caso

Finalmente, debe destacarse la incorporación de dos anexos, el Anexo I recoge los criterios de calidad para la utilización de las aguas regeneradas según los usos, estos criterios tendrán la consideración de mínimos obligatorios exigibles. Por su parte el Anexo II contiene el modelo normalizado de solicitud que deben presentar quienes deseen obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas depuradas.

El presente Real Decreto deroga, con carácter general, cuantas disposiciones de igual o inferior rango se opongan a lo en él dispuesto y, en particular, los artículos 272 y 273 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico aprobado por Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.

En su virtud, a propuesta del Ministro de Medio Ambiente, consultado el Ministerio de Sanidad y Consumo, de acuerdo con el Consejo de Estado y previa deliberación del Consejo de Ministros:

**DISPONGO:**

### **Artículo 1. Concepto de reutilización.**

Se entiende por reutilización de las aguas la aplicación, antes de su devolución al dominio público hidráulico, al marítimo terrestre así como a azarbes y elementos de desagüe, para un nuevo uso privativo de las aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar.

### **Artículo 2. Definiciones**

A efectos de esta disposición se entenderá por:

1. *Aguas depuradas*: aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.
2. *Aguas regeneradas*: aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al

uso al que se destinan. A efectos de este Real Decreto uso de aguas regeneradas es equivalente a reutilización de aguas.

3. *Estación regeneradora de aguas*: conjunto de instalaciones donde las aguas residuales depuradas se someten a procesos de tratamiento adicional que puedan ser necesarios para adecuar su calidad al uso previsto.

4. *Infraestructuras de almacenamiento y distribución*: conjunto de instalaciones destinadas a almacenar y distribuir el agua regenerada por medio de una red o bien depósitos móviles públicos y privados.

5. *Sistema de reutilización de las aguas*: conjunto de instalaciones que incluye la estación regeneradora de aguas, en su caso, y las infraestructuras de almacenamiento y distribución de las aguas regeneradas hasta el punto de entrega a los usuarios, con la dotación y calidad definidas según los usos previstos.

6. *Primer usuario*: persona física o jurídica que ostenta la concesión para la primera utilización de las aguas derivadas.

7. *Usuario del agua regenerada*: persona física o jurídica o entidad pública o privada que utiliza el agua regenerada para el uso previsto.

8. *Punto de entrega de las aguas depuradas*: lugar donde el titular de la autorización de vertido de aguas residuales entrega las aguas depuradas en las condiciones de calidad exigidas en la autorización de vertido para su regeneración.

9. *Punto de entrega de las aguas regeneradas*: lugar donde el titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas entrega a un usuario las aguas regeneradas, en las condiciones de calidad según su uso previstas en esta disposición.

10. *Lugar de uso del agua regenerada*: zona o instalación donde se utiliza el agua regenerada suministrada.

11. *Autocontrol*: programa de control analítico sobre el correcto funcionamiento del sistema de reutilización realizado por el titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas.

---

### **Artículo 3. Requisitos para llevar a cabo la actividad de reutilización de aguas.**

1. La reutilización de las aguas procedentes de un aprovechamiento requerirá concesión administrativa tal como establecen los artículos 59.1 y 109 de la Ley de Aguas, Texto Refundido aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.
2. No obstante lo establecido en el apartado anterior, en el caso de que la reutilización fuese solicitada por el titular de una autorización de vertido de aguas residuales, se requerirá solamente una autorización administrativa. Esto mismo será de aplicación en aquellos casos en que se soliciten a un tiempo las autorizaciones de vertido y de reutilización.
3. En el caso de que no coincidan en una misma persona, física o jurídica, la condición de primer usuario de las aguas y de titular de la autorización de vertido se entenderá preferente la solicitud de reutilización que hubiese presentado el titular de la autorización de vertido.
4. La misma preferencia a favor del titular de la autorización de vertido se entenderá reconocida respecto de las solicitudes de concesión de reutilización que presenten terceros que no coincidan con el primer usuario de las aguas.

### **Artículo 4. Régimen jurídico de la reutilización.**

Será aplicable a la reutilización el régimen jurídico establecido en las secciones 1ª “La concesión de aguas en general” y 2ª “Cesión de derechos al uso privativo de las aguas” del Capítulo III del Título IV del Texto Refundido de la Ley de Aguas.

### **Artículo 5. La concesión de reutilización de aguas.**

1. Cuando la solicitud de concesión para reutilizar aguas sea formulada por quien ya es concesionario para la primera utilización de las aguas, pero no es titular de la autorización de vertido, el procedimiento se tramitará, sin competencia de proyectos, de acuerdo con lo que establece el artículo siguiente.
2. Si quien formula la solicitud de concesión para reutilización es un tercero que no ostenta la condición de concesionario para la primera utilización, ni la de titular de la autorización de vertido de las aguas residuales, se seguirá el procedimiento que establece el Reglamento de Dominio Público Hidráulico para las concesiones en general, previa presentación de la solicitud para obtener la concesión de reutilización de

aguas según el modelo del Anexo II. La propuesta de condiciones en la que podría otorgarse la concesión para reutilizar las aguas determinará los extremos establecidos en el artículo 6.2 párrafo 4º de este Real Decreto.

**Artículo 6. Procedimiento aplicable a quien es concesionario de la primera utilización.**

1. El expediente se iniciará por el concesionario de las aguas para la primera utilización que a tal efecto deberá presentar su solicitud en el modelo normalizado que figura en el Anexo II, en ella manifestará su propósito de reutilizar las aguas, con indicación del uso para el que las solicita.

2. El procedimiento de concesión consta de los trámites siguientes:

1º. El peticionario deberá presentar un proyecto de reutilización de aguas que contemple la documentación necesaria para identificar el origen y la localización geográfica de los puntos de entrega del agua depurada y regenerada; el volumen anual solicitado; el uso al que se va a destinar; el lugar de uso del agua regenerada; las características de calidad del agua regenerada correspondientes al uso previsto así como el autocontrol analítico propuesto como establece el Anexo I de este Real Decreto; el sistema de reutilización de las aguas; los elementos de control y señalización del sistema de reutilización; las medidas para el uso eficiente del agua y las medidas de gestión del riesgo en caso de calidad inadmisibles de las aguas regeneradas para el uso admitido.

2º. Cuando el destino de las aguas regeneradas fuese el uso agrícola se acreditará la propiedad de las tierras que se pretenden regar a favor del peticionario o, en el caso de concesiones solicitadas por comunidades de usuarios, el documento que acredite que la solicitud de concesión ha sido aprobada por la Junta General. Se presentará en todo caso una copia actualizada del plano parcelario del catastro, donde se señalará la zona regada.

3º. El Organismo de cuenca examinará la documentación presentada e informará sobre la compatibilidad o incompatibilidad de la solicitud con el Plan Hidrológico de cuenca. En el primer caso continuará la tramitación del expediente; en el segundo denegará la solicitud presentada. Simultáneamente solicitará el informe al que se refiere el artículo 25.3 de la Ley de Aguas, para el que se concede el plazo

de un mes, transcurrido el cual, sin que se haya emitido, continuará la tramitación del expediente en los términos previstos en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y el Procedimiento Administrativo Común. El informe emitido por la autoridad sanitaria se ajustará a la regla establecida en el artículo 83.4 en relación con el artículo 42.5c) de la Ley 30/1992 ya citada.

4°. A continuación, el Organismo de cuenca elaborará una propuesta en la que se establecerán las condiciones en las que podría otorgarse la concesión para reutilizar las aguas. Este condicionado contendrá, entre otros extremos:

- a) El origen y la localización geográfica del punto de entrega del agua depurada;
- b) El volumen máximo anual en metros cúbicos y modulación establecida, caudal máximo instantáneo expresado en litros por segundo.
- c) El uso admitido;
- d) El punto de entrega y el lugar de uso del agua regenerada;
- e) Las características de calidad del agua regenerada que deben cumplir los criterios de calidad exigidos para cada uso que se establecen en el Anexo I.A de este Real Decreto, hasta su punto de entrega a los usuarios;
- f) El sistema de reutilización de las aguas;
- g) Los elementos de control y señalización del sistema de reutilización;
- h) El programa de autocontrol de la calidad del agua regenerada que incluya los informes sobre el cumplimiento de la calidad exigida que se determinará conforme establece el Anexo I.B y I.C;
- i) El plazo de vigencia de la concesión;
- j) Las medidas de gestión del riesgo en caso de calidad inadmisibles de las aguas para el uso autorizado;
- k) Cualquier otra condición que el Organismo de cuenca considere oportuna en razón de las características específicas del caso y del cumplimiento de la finalidad del sistema de reutilización del agua.

5º. Elaborada la propuesta de condiciones, se solicitará la conformidad expresa del petitionario que tendrá lugar en el plazo de 10 días hábiles. Transcurrido este plazo, el Organismo de cuenca resolverá en el plazo máximo de un mes, contado desde que ha tenido constancia de la conformidad.

6º. Si el solicitante no estuviera de acuerdo con las condiciones propuestas, presentará motivación justificada que podrá ser o no admitida, dando lugar a resolución expresa de la Administración en el plazo de un mes.

7º. De no haber respuesta, se denegará la concesión solicitada en el plazo de un mes, contado desde la notificación de la propuesta de condiciones.

#### **Artículo 7. Procedimiento para obtener la autorización de reutilización de aguas.**

1. Cuando se presente una solicitud para reutilizar las aguas por el titular de la autorización de vertido se le otorgará una autorización administrativa, que tendrá el carácter de complementaria a la de vertido, en la que se establecerán los requisitos y condiciones en los que podrá llevarse a cabo la reutilización del agua.

2. El procedimiento para otorgar la autorización de reutilización es el siguiente:

1º. Para obtener la autorización complementaria a la de vertido será preciso presentar la solicitud prevista en el Anexo II con la información exigida en el artículo 6.2.1º y, en su caso, 6.2.2º.

2º. El Organismo de cuenca recabará el informe de la Comunidad Autónoma y los que procedan en cada caso que deberán emitirse en el plazo de un mes, transcurrido el cual continuará la tramitación del expediente en los términos previstos en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común. El informe emitido por la autoridad sanitaria se ajustará a la regla establecida en el artículo 83.4 en relación con el artículo 42.5c) de la mencionada Ley.

3º. Los sucesivos trámites serán los establecidos en los párrafos 3º, 4º, 5º, 6º y 7º del apartado 2 del artículo 6 de este Real Decreto.

---

## **Artículo 8. Disposiciones comunes a la concesión y autorización de reutilización de aguas.**

1. Tanto las concesiones de reutilización como las autorizaciones de reutilización serán inscritas en la Sección A) del Registro de Aguas en la forma que establece el artículo 192 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico.
2. El incumplimiento de las obligaciones derivadas del condicionado de la concesión o autorización de reutilización será sancionado con arreglo a lo dispuesto en el Título VII del Texto Refundido de la Ley de Aguas.
3. El titular de la concesión o autorización de reutilización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización de las aguas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento y responderá permanentemente de dicha adecuación.

## **Artículo 9. Características de los contratos de cesión de derechos sobre aguas regeneradas.**

1. Los titulares de la concesión de reutilización y los titulares de la autorización complementaria para reutilización de las aguas podrán suscribir contratos de cesión de derechos de uso de agua de acuerdo con lo establecido en los artículos 67 y 68 de la Ley de Aguas con las siguientes particularidades:
  - a. El volumen anual susceptible de cesión no será superior al que figure en la concesión o autorización otorgada.
  - b. La Administración Pública al autorizar el contrato suscrito, además de velar por el cumplimiento de los criterios previstos en el artículo 68.3 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, observará que se cumplen los criterios de calidad en relación a los usos a que se vayan a destinar los caudales cedidos.
2. Quienes obtienen la concesión o la autorización de reutilización podrán ceder, en los términos que establece el artículo 343 del Reglamento de Dominio Público Hidráulico, con carácter temporal a otro concesionario o titular de derechos de igual rango, la totalidad o parte de los derechos de uso que le correspondan, percibiendo a cambio la compensación económica que establece el artículo 345.2 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico. De igual modo podrán participar en las operaciones de los Centros de Intercambio de Derechos.



---

**Artículo 10. Usos admitidos para las aguas regeneradas.**

1. Las aguas regeneradas podrán utilizarse para los usos indicados en el Anexo I.A de este Real Decreto.
2. En los supuestos de reutilización del agua para usos no contemplados en el Anexo I.A, el Organismo de cuenca exigirá las condiciones de calidad que se adapten al uso más semejante de los descritos en el mencionado Anexo. Será necesario, en todo caso, motivar la reutilización del agua para un uso no descrito en el mismo.
3. En todos los casos de reutilización de aguas, el Organismo de cuenca solicitará de las autoridades sanitarias un informe que tendrá carácter vinculante.
4. Se prohíbe la reutilización de aguas para los siguientes usos:
  - a. Para el consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas.
  - b. Para los usos propios de la industria alimentaria, tal y como se determina en el artículo 2.1 b) del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
  - c. Para usos de refrigeración en instalaciones hospitalarias y otros usos similares.
  - d. Para el cultivo de moluscos filtradores en acuicultura.

**Artículo 11. Normas específicas para las concesiones y autorizaciones de reutilización de aguas.**

1. Las aguas regeneradas deben cumplir en el punto de entrega los criterios de calidad según usos establecidos en el Anexo I.A. Si un agua regenerada está destinada a varios usos serán de aplicación los valores más exigentes de los usos previstos.
2. Los Organismos de cuenca, en las resoluciones por las que otorguen las concesiones o autorizaciones de reutilización, podrán fijar valores para otros parámetros o contaminantes que puedan estar presentes en el agua regenerada o lo prevea la normativa sectorial de aplicación al uso previsto para la reutilización. Asimismo, podrán fijar niveles de calidad más estrictos de forma motivada.

3. La calidad de las aguas regeneradas se considerará adecuada a las exigencias de este Real Decreto si el resultado del control analítico realizado de acuerdo con lo previsto en el Anexo I.B cumple con los requisitos establecidos con el Anexo I.C
4. El titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas es responsable de la calidad del agua regenerada y de su control desde el momento en que las aguas depuradas entran en el sistema de reutilización hasta el punto de entrega de las aguas regeneradas.
5. El usuario del agua regenerada es responsable de evitar el deterioro de su calidad desde el punto de entrega del agua regenerada hasta los lugares de uso.
6. La concesión de reutilización podrá ser modificada como consecuencia de las variaciones o modificaciones que se aprueben respecto de la concesión otorgada para el uso privativo del agua al primer usuario de la misma.

**Artículo 12. La reutilización de aguas a través de iniciativas o planes de las Administraciones Públicas.**

1. Con la finalidad de fomentar la reutilización del agua y el uso más eficiente de los recursos hidráulicos, las Administraciones Públicas estatal, autonómica o local, en el ámbito de sus respectivas competencias, podrán llevar a cabo planes y programas de reutilización de aguas. En estos planes se establecerán las infraestructuras que permitan llevar a cabo la reutilización de los recursos hidráulicos obtenidos para su aplicación a los usos admitidos. En dichos planes se especificará el análisis económico-financiero realizado y el sistema tarifario que corresponda aplicar en cada caso.
2. En la ejecución de los citados planes, se cumplirán las exigencias establecidas en el artículo 109 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, y en este Real Decreto respecto de la necesidad de obtener la concesión o autorización de reutilización de aguas por quien vaya a realizar la actividad.
3. Si la explotación se realiza de forma temporal o permanente por alguna de las administraciones públicas, estatal, autonómica o local, la concesión o autorización de reutilización se otorgará a nombre de la misma, o de la entidad o sociedad pública a quien se haya encomendado la ejecución de las infraestructuras o su explotación, que será la responsable del cumplimiento de todas las condiciones impuestas durante los periodos de prueba y explotación.

4. Cuando la explotación de una infraestructura correspondiese a determinados usuarios, será preciso que la Administración Pública correspondiente lleve a cabo la entrega de dicha infraestructura formalizando el oportuno documento en el que deberán constar todas las circunstancias en las que se produce la entrega. En particular se mencionará el hecho de que se transfiere a los usuarios, desde ese momento, la concesión o autorización de reutilización del agua y en consecuencia la responsabilidad en el cumplimiento de las condiciones impuestas. En el ámbito de la Administración General del Estado, las Sociedades Estatales de Aguas solicitarán la necesaria concesión o autorización respecto de las instalaciones de reutilización que se le hubieran encomendado en el correspondiente Convenio de Gestión Directa.
5. Cuando la explotación del sistema de reutilización del agua se realice a través de contratos de concesión de obra pública, el concesionario estará obligado a solicitar la correspondiente concesión o autorización de reutilización.

## Anexo C: Normas sobre el grado de protección IP

El índice de protección es un estándar internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional, que clasifica el nivel de protección que provee una aplicación eléctrica contra la intrusión de objetos sólidos o polvo, contactos accidentales o agua.

El resultado es el Índice de protección la explicación a las letras IP es dada la norma CEI 60529, donde se identifica por un código que consiste en las letras IP seguidas por dos dígitos y una letra. El primer dígito, indica la protección a la intrusión de objetos sólidos o polvo en un rango de 0 a 6, donde 0 es sin protección y 6 es que elimina todo el polvo; el segundo dígito se refiere a la protección de líquidos en un rango de 0 a 8, donde 0 es sin protección y 8 es sumergible durante un tiempo largo bajo presión.

En la Tabla 9, podemos ver el grado de protección que presenta cada dígito:

Nº1	Protección de sólidos	Nº2	Protección de líquidos
0	Sin protección	0	Sin protección
1	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 50mm.	1	Protegido contra la caída vertical de gotas de Agua. (Goteo).
2	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 12mm.	2	Protección contra la caída de gotas de agua hasta 15° de la vertical.
3	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 2,5 mm.	3	Protegido contra la caída de agua de lluvia de hasta 60° de la vertical.
4	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 1mm.	4	Protegido contra las proyecciones de agua en todas las direcciones.
5	Protección contra el polvo (ningún depósito en cantidad perjudicial para el equipo).	5	Protegido contra el lanzamiento de agua desde todas las direcciones.
6	Totalmente protegido contra el polvo.	6	Protegido contra el lanzamiento de agua, sumado a los golpes de mar.
		7	Protegido contra los efectos dañinos de la inmersión.
		8	Protegido contra los efectos de la inmersión prolongada bajo presión.

Tabla 9: Grados de protección para sólidos y líquidos.